

Brandenburgische Technische Universität Cottbus
Fakultät Umweltwissenschaften und Verfahrenstechnik

HABILITATIONSSCHRIFT
im Fach Geologie

THEMA Die Geologische Erkundung von Abraumförderbrücken-Innenkippen
in Niederlausitzer Braunkohlentagebauen

vorgelegt von: Dr. Reinhard Oehmig, Dipl.-Geologe
geboren am: 7. 12. 1955 in Remscheid

Cottbus, März 2003

Vorwort

Die vorliegende Arbeit basiert wesentlich auf den Untersuchungen (1997-1999) im DFG-geförderten Innovationskolleg „Ökologisches Entwicklungspotential der Bergbaufolgelandschaften im Niederlausitzer Braunkohlerevier“ (Sprecher Prof. Dr. R. Hüttl) an der Brandenburgischen Technischen Universität Cottbus.

Von der Projekt-Initiative bis zur kritischen Diskussion der Ergebnisse hat Herr Geologiedirektor i.R. Dipl.-Geol. G. Voigt die Arbeit stetig durch Rat und Tat unterstützt. Sein Erfahrungsschatz, vor allem aus der Braunkohlenlagerstättenerkundung, ermöglichte es mir, Bewährtes auf die Entwicklung der Grundlagen zur Lösung aktueller nachbergbaulicher Probleme zu übertragen. Hierfür sowie die unermüdliche Diskussionsbereitschaft danke ich ihm in besonderem Maße.

Herrn Prof. Dr. H.-J. Voigt danke ich für den gewährten Forschungsfreiraum am Lehrstuhl Umweltgeologie der BTU Cottbus und die kritisch-konstruktive Durchsicht des Manuskripts.

Herrn Prof. Dr. R. Hüttl, Cottbus danke ich für die gewährte Möglichkeit, dieses Thema der Umweltgeologie im Rahmen des Innovationskollegs zu bearbeiten.

Herrn Prof. Dr. U. Grünewald, BTU Cottbus danke ich für die stets weiterführenden Fragen und die Aufgeschlossenheit gegenüber der geologischen Kippenerkundung.

Den Herren Dipl.-Geol. F. Thiemig, Geol.-Ing. Lorke, Dipl.-Ing. (Markscheidewesen) Siewers und Herrn Dipl.-Ing. Klix (Fa. L M B V, Senftenberg-Brieske) danke ich für Informationen zu Deckgebirgsgeologie und tagebautechnologischen Zusammenhängen sowie für die Bereitstellung von Karten und geologischen Profilschnitten.

Bei Herrn Dipl.-Geophys. Dr. H. Petzold und Herrn Geol.-Ing. Kloß (Fa. L A U B A G, Senftenberg, Cottbus), bedanke ich mich für wertvolle Hinweise zur Log-Auswertung und zur Praxis des Unternehmens bei der kf-Wert-Ermittlung in Gewachsenem und in der Kippe.

Zum Gelingen der Arbeit trugen wesentlich bei: Frau Kuschke (Fa. PANITZ, Kittlitz) sowie die Herren Dipl.-Geol. Baumann und Dipl.-Geophys. Burde (Fa. BLM, Storkow) mit dem Bohr- und Bohrlochmeßprogramm, Herr Dr. Gebhardt (Fa. G.E.O.S, Freiberg) mit der Korngrößenanalytik, die Herren Dr. Wiehe und Dr. Fischer (ZAL BTU Cottbus) mit der geochemischen Analytik, Herr Dr. Hüniger (FMPA BTU Cottbus) mit Durchführung und Erläuterung der Ergebnisse der Mineralanalytik. Den genannten wird für die zügige Bearbeitung des Bohr-, Mess- und Analysenprogramms gedankt.

Den Herren cand. Ing. N. Martin, W. Jäger und Dipl.-Ing. M. Furch danke ich für die sorgfältige Durchführung der aufwendigen Probenaufbereitung.

Herrn Dipl.-Geol. Dr. R. Herd danke ich für wichtige Hinweise in Diskussionen. Herrn Dipl.-Geol. C. Jahnke und Frau Dipl.-Geol. A. Bohn für die kollegiale Unterstützung, Frau Jakopaschke für die stete Hilfsbereitschaft.

Für die Unterstützung in jeder Hinsicht danke ich Ute, Marcus und Fabian.

Zusammenfassung

Bei der Gewinnung von Braunkohle im entwässerten Tagebaureaum kommt es durch die Abgrabung des Flöz-Deckgebirges mit Abraumförderbrücken (AFB) zu einem Neuaufbau des Deckgebirge-Schichtenmaterials in der AFB-Innenkippe. Das infolge Sulfidoxidation versauerte Kippenwasser, die unbekannten hydraulischen Eigenschaften und die lockere Lagerung des geschütteten Deckgebirgematerials sind Merkmale der mit dem Grundwasserwiederanstieg verbundenen *negativen Auswirkungen*.

Ausmaß und Zeit der im Laufe des Anstiegs-Prozesses eintretenden Beeinträchtigungen werden von der *Verteilung* der petrographisch-stofflichen und petrophysikalischen Eigenschaften im Abraummischungskörper bestimmt, welche daher für die Prognose der Wirkungen und gezielte Sanierungsmaßnahmen bekannt sein muß.

Grundüberlegung für Ansatz und Entwicklung der *Geologischen Kippenerkundung* aus der Braunkohlenlagerstättenerkundung ist, die Kippe als geo-technogenen Lockergesteinskörper zu sehen, bei dem aufgrund des gerichteten Schüttungsvorgangs und vertikalen Kippscheibenbaus die räumliche Mischungs-Veränderung des abgegrabenen sedimentpetrographischen Materials mit Kern- und Spülbohrungen und geophysikalischen Bohrlochmessungen (BLM, Logs) zu erfassen ist.

Die *Zusammenhänge* zwischen den petrophysikalischen (Auswertung Bohrlochmessungen) und petrographisch-stofflichen Eigenschaften (Analytik Bohrkern) der Abraumschüttungskörper mit den besonderen *kippengeologischen Merkmalen* „Mischung unterschiedlicher Lithologien“, „lockere Lagerung und ihre Änderung beim Grundwasseraufstieg“ wurden untersucht. Im Ergebnis können wie bei natürlich entstandenen Sedimentgesteinskörpern mit schichtenweise petrographisch einheitlich zusammengesetzten und diagenetisch verfestigten Abfolgen zur Verbesserung der Informationsgrundlage über die Schüttungsfolgen auch *Spülbohrungen/BLM* neben den aufwendigen Kernbohrungen genutzt werden.

Die Auswertung der erkundeten räumlichen Verteilung säuregenerierender und puffernder Bestandteile der Abraummischung ergab, daß entsprechend dem **Faktor Geologie** (Zusammensetzung und Mächtigkeit der verkippten Deckgebirgsschichten) in der *AFB-Innenkippe Seese-Ost* (Baruther Urstromtal, Ø 1,5 m Hangendschluff, sulfidhaltig; Ø 5 m Geschiebemergel, karbonathaltig) während des Kippenwasseraufstiegs die potentiell aus **0,08 bis 0,2 % FeS_2** entstehende H_2SO_4 durch einen Überschuß an CaCO_3 *vollständig gepuffert* werden.

Dagegen weist die Bilanz aus Versauerungs- und Pufferpotential für die *AFB-Innenkippe Meuro* (Breslau-Magdeburger Urstromtal, Ø 11 m Hangendschluff, kaum Geschiebemergel) mit **0,7 bis 1,4 % FeS_2** in den oberen ca. 25 m der 60 mächtigen Abraummischungsfolge Kippenwasser-**pH zwischen 1,3 und 1,7** aus.

Der **Faktor Technologie** bedingt die Verkipfung bindiger Abraumsedimente vor allem in *oberen Kippscheiben*, mit der Folge, daß die Hangendschluff-Sedimente mit FeS_2 in deren kohligter Substanz zu maximaler Versauerung des Kippenwassers der *Innenkippe Meuro* um das Jahr 2011 führen (GW-Anstieg von ~ 40 auf 80 m NN). Mit den gleichzeitig maximalen Al-Gehalten > 4 % (Ton- und Glimmerminerale) in der Abraummischung sowie Ti und Co, Ni, Zn werden diese Metalle max. erst in diesem Stadium ins Kippenwasser mobilisiert.

Im *Abraumschüttungskörper Seese-Ost* sind maximale Al-Gehalte durch die Ton- und Schluffkomponente der karbonathaltigen Geschiebemergel verursacht. Mit dem für die nördlichen Randfelder des Niederlausitzer Braunkohlenreviers charakteristisch geringmächtigen Hangendschluff, verzahnt mit den „Seeser Sanden“, und somit niedriger

FeS₂-Konzentration korreliert Al im Gegensatz zu Meuro negativ mit FeS₂. Durch die vollständige Pufferung der potentiell freiwerdenden Säure ist eine Mobilisation von Stoffen ins Kippenwasser Seese wenig wahrscheinlich.

Für die *Porosität*, zum Teil Ausdruck des Setzungs- und Sackungspotentials der lockeren Abraumschüttung sind in der Kippe Seese-Ost und Meuro geringste Werte im mittleren und höchste im oberen Teufenabschnitt kennzeichnend.

In der Konsequenz ergeben sich aus Kippentopographie und Grundwasserflurabstand Kippenbereiche, in denen das aufsteigende Grundwasser das Korngefüge der locker lagernden Partikel der Abraummischung einregelt und so zur *Konsolidierung von Tieflagen* führt. Typisch z.B. im „Schwenkende“ mit Massendefizit bei in Tagebauaufschwenkrichtung zunehmender Strossenlänge. Dagegen verbleibt in *Hochlagen* wie dem Tagebau-Drehpunktbereich mit Massenüberschuß 10er m mächtig Abraumschüttung in *lockerer Lagerung*.

Die Kippe unterliegt Jahre bis Jahrzehnte den Bedingungen der *wasserungesättigten Zone*. Der *Gastransport durch Diffusion* aus der Atmosphäre in die Grundluft ermöglicht über die Zufuhr von verbrauchtem Sauerstoff dabei fortwährend die Sulfid-Oxidation.

Die praktizierte Vorgehensweise bei der Sanierung von Wasserhaushalt und - Beschaffenheit ist das „*Schnelle Fluten der Restlochseen mit Fremdwasser*“ (Luckner 1997). In der Kippe steigt dabei – angestrebt mit zeitlicher Verzögerung zum Seespiegelanstieg - das Grundwasser an, nimmt die Reaktionsprodukte der vorangegangenen Sulfid-Oxidation auf und bewirkt, entsprechend der geringen Diffusion in der wäßrigen Lösung die gravierende Verringerung des Zutritts von Sauerstoff.

Diese Vorgehensweise erfordert nach Flutungsabschluß das Aufrechterhalten eines Gradienten von Restlochseewasser in die Kippen hinein, damit die „hydraulische Einkapselung“ des sauren Kippenwassers im Kippenkörper gewährleistet bleibt. Diese *Nachsorge* ist auf unbestimmte Dauer notwendig, da das insgesamt in den Kippenkörpern vorhandene Säurepotential ohne Geologische Kippenerkundung *nicht bekannt* ist.

Um die *Nachsorge möglichst schnell abzuschließen*, wird vorgeschlagen, die „Schadstoffquelle direkt zu bekämpfen“ und eine Alkalisierung des sauren Kippenwassers *in der Kippe* vorzunehmen und – da zeitweilige Gradienten und Stoffströme zum Restlochsee unvermeidbar sind – in Kombination dazu Wasserbehandlung *im Restlochsee* vorzunehmen.

Mit der erkundeten Lage der *Bereiche* potentiell maximaler Versauerung/Folgereaktionen im Kippenkörper kann z.B. das *unterhalb* befindliche Tiefenniveau für die *flächenhafte* Zugabe von, nach der Bilanz notwendigen Mengen an Alkalisierungsmittel in das *aufsteigende* Grundwasser festgelegt werden.

Kurzfassung

Bei der Gewinnung von Braunkohle im entwässerten Tagebauraum kommt es durch die Abgrabung des Flöz-Deckgebirges mit Abraumförderbrücken (AFB) zu einem Neuaufbau des Deckgebirge-Schichtenmaterials in der AFB-Innenkippe. Nach Auskohlung bzw. Stillsetzung des Tagebaus und stetiger Verminderung der Sumpfung trifft das wiederaufgehende Grundwasser im Abraumschüttungskörper auf eine *Mischung* der Deckgebirgsfolge.

Das infolge Sulfidoxidation *versauerte Kippenwasser*, die *unbekannten hydraulischen Eigenschaften* und die *lockere Lagerung* des geschütteten Deckgebirgematerials sind Merkmale der mit dem Grundwasseranstieg verbundenen negativen Auswirkungen. *Ausmaß und Zeit* der Beeinträchtigungen werden von der *Verteilung* der petrographisch-stofflichen und petrophysikalischen Eigenschaften im *Raum* der AFB-Innenkippen bestimmt, welche daher für die Prognose der Wirkungen und gezielte Sanierungsmaßnahmen bekannt sein muß.

Grundüberlegung für die *Geologische Kippenerkundung* ist, die AFB-Innenkippe als geotechnogenen Lockergesteinskörper zu sehen, bei dem aufgrund des gerichteten Schüttungsvorgangs und vertikalen Kippscheibenbaus die räumliche Mischungs-Veränderung des abgegrabenen sedimentpetrographischen Materials mit *Bohrungen*, d.h. Kern- und Spülbohrungen und geophysikalischen Bohrlochmessungen (BLM, Logs) zu erfassen ist.

Exemplarisch für die *quartärgeologische Zonierung* des Niederlausitzer Braunkohlenreviers wurden die im Schwenkbetrieb entstandenen AFB-Innenkippen Tagebau Seese-Ost (Baruther Urstromtal) und AFB-Innenkippe Tagebau Meuro (Breslau-Magdeburger Urstromtal) eines N-S-Profils *kippengeologisch erkundet* und hinsichtlich der Prognose der *Kippenwasserentwicklung* beim Aufstieg des Grundwassers ausgewertet.

Die *kippengeologische Erkundungsmethode* wurde aus der Braunkohlenlagerstättenerkundung von Deckgebirge und Flöz entwickelt und an Innenkippen unter *Berücksichtigung* der besonderen Kippenmerkmale, wie „gerichtete Entstehung“ und „Mischung“ sowie „lockere Lagerung/Änderung beim Grundwasseranstieg“ angewandt. Die Durchführung und Auswertung wird in den Erkundungs- und Untersuchungsstadien I.-VI. behandelt.

I. Geologischer Aufschluß der Abraumschüttungskörper mit Bohrungen

Die Erkundungsbohrungen wurden nach Strossen- und Verkippungsrichtung auf der Tagebaukippe angeordnet. Es wurde lückenlos beprobt. Für Bohrkernanalytik und Bohrlochmessung wurde ein *einheitliches* Mischprobenintervall von 5m verwendet.

II. Untersuchung der Zusammenhänge zwischen petrophysikalischen (Bohrlochmessungen) und petrographisch-stofflichen Eigenschaften (Analytik Bohrkern)

- ***Messung der natürlichen Radioaktivität (GR-Log)*** – Auch bei *Verdünnungswirkung* infolge *Mischung* kann, wie im anstehenden, schichtenweise einheitlich zusammengesetzten Deckgebirge, der Feinkornanteil (< 0,063 mm) aus dem GR-Log angegeben werden.
 - ***Dichtemessung (GG-Log)*** – Korngrößenverteilung, Korneinregelung beim Schüttungsvorgang und Vorgänge nach der Schüttung wirken auf die Packungs-*Dichte* der locker lagernden Abraummischung. Der Zusammenhang höherer Dichten „gröberer“ und ungleichförmigerer Abraumschüttungen wird durch den Feinkornanteil, abhängig von dessen petrographischer Herkunft überprägt. Hoher Feinkornanteil aus *Geschiebemergel-Aggregaten* bedeutet verringerte Dichte (Porositäts-erhöhung), hohe Feinkornanteile aus der Ton-Schluff-Komponente des *Hangendschluffs* führen zu höherer Dichte.
-

- **Porosität und Durchlässigkeit - Veränderung beim Grundwasserwiederanstieg in die „trockene“ Abraumschüttung** - Die aus der Dichte der lockeren Abraumschüttung ermittelte *Porosität* steht zum Teil für das Setzungs- und Sackungspotential infolge Korngefügeeinregelung durch das Wasser. Die *Überschätzung der Lagerungsdichte* (Unterschätzung des Verformungspotentials) mit Drucksondierungen durch festigkeitserhöhendes Feinkorn in Kornkontaktflächenmenisken, das durch aufgehendes Grundwasser wieder gelöst wird, ist durch diese *Information über die Partikellagerung* vermeidbar.

Die *Hydraulische Leitfähigkeit* der Abraumschüttung wird am besten aus der *Charakteristik der Korngrößenverteilung* bestimmt, da diese auch nach Durchgang des aufsteigenden Kippenwasserspiegels und Korngefügeeinregelung maßgebend ist.

Der für die *k_f*-Wert-Ermittlung aus der Korngrößenverteilung festgestellte dominierende Einfluß des Anteils < 0,063 mm ermöglicht, die *k_f-Werte in den Spülbohrungen* aus dem Feinkornanteil (GR-Log) abzuleiten.

- Mit den **Petrographie-Petrophysik-Beziehungen** aus der vergleichenden Bohrkern-Log-Analyse konnten auch in den Kippenbereichen mit *Spülbohrungen (und BLM)* petrographische Eigenschaften der lockeren Abraumschüttung angegeben werden, wodurch Bohrungszahl und Informationsgrundlage über die Schüttungsfolgen ohne aufwendige Kernbohrungen erhöht bzw. verbessert wird.

III. Konstruktion Kippengeologischer Profilschnitte

Die *räumliche Veränderung* der Eigenschaften der Abraummischung wurde durch die *Konstruktion Geologischer Profilschnitte* mit Flächen gleichen Parameterwertintervalls in Strossen- und Verkippungsrichtung erfaßt. Die Veränderung bzw. *laterale Konstanz* der reaktions- und durchflußwirksamen Eigenschaften dokumentiert, wie unterschiedliche Kippenbereiche infolge vergleichbarer Faktoren Deckgebirgsgeologie und Verkippungstechnologie in räumlicher Beziehung zueinander stehen.

IV. Entwicklung des Kippenwasser-pH beim Grundwasserwiederanstieg

Die vertikale und laterale Veränderung der chemischen Zusammensetzung wurde hinsichtlich der *pH-Wertentwicklung des Kippenwassers* beim Grundwasseraufstieg ausgewertet. Für die hydrogeochemischen Reaktionen wird zugrundegelegt:

- Der Kippenwasserspiegel erfaßt die Abraummischung *flächenhaft* über den gesamten Kippenkörper, so daß im Unterschied zu den isolierten vertikalen Sickerbahnen des Niederschlags in der „trockenen“ Kippe die *insgesamt* enthaltenen Stoffe beim Wasseraufstieg reagieren können.
- FeS₂ wird *vollständig* säurebildend wirksam (ungünstigster Fall); die freigesetzte Säure wird, abhängig vom CaCO₃-Gehalt gepuffert.
- Der Ablauf wird, angepaßt an das „Auflösungsvermögen“ der Beprobung in *5m-Aufstiegs-Scheiben* unterteilt, bei *v_{Anstieg}* von 1,4 ... 0,7 cm/Tag entsprechend einem *Zeitintervall* von 1 ... 2 Jahren. Die FeS₂- und CaCO₃-Konzentrationen aus der Kippenfläche werden für die *Bilanz* aus Versauerung und Pufferung auf die 5m-Teufenabschnitte zusammengeführt. Anteilig (1:1) werden Konzentrationen der Kippenwassermischung mit der jeweils folgenden Scheibe errechnet.
- Versauerung und Pufferung verlaufen bis zum Erreichen des Soll-Kippenwasserspiegels *vollständig*. Darüber wird durch Sickerwasser und atmosphärische Luftfeuchtigkeit FeS₂ vollständig oxidiert. Da keine durchgehende Sättigung erreicht wird, trägt das Karbonat dieses Kippenstockwerks *nur teilweise* zur Pufferung bei.

Entsprechend dem **Faktor Geologie** (Zusammensetzung und Mächtigkeit der verkippten Deckgebirgsschichten) wird in der *AFB-Innenkippe Seese-Ost* (Baruther Urstromtal, Ø 1,5 m Hangendschluff, sulfidhaltig; Ø 5 m Geschiebemergel, karbonathaltig) während des Kippenwasseraufstiegs die potentiell aus **0,08 bis 0,2 % FeS₂** entstehende H₂SO₄ durch einen Überschuß an CaCO₃ *vollständig gepuffert*.

Dagegen weist die Bilanz aus Versauerungs- und Pufferpotential für die *AFB-Innenkippe Meuro* (Breslau-Magdeburger Urstromtal, Ø 11m mächtiger Hangendschluff, kaum Geschiebemergel) mit **0,7 bis 1,4 % FeS₂** in den oberen ca. 25 m der Abraummischungsfolge Kippenwasser-**pH zwischen 1,3 und 1,7** aus.

Infolge der unterschiedlichen petrographischen Herkunft und Mengen (Geschiebemergel bzw. Hangendschluff) korrespondiert *mit* dem Feinkornanteil (< 0,063 mm) in der Abraummischung Seese-Ost der Anteil CaCO₃ - *Pufferpotential*, in Meuro FeS₂ - *Säurebildungspotential*. Die Zunahme des Karbonatgehalts zum Schwenkende, Tagebau Seese-Ost ist Ausdruck der Annäherung der kohlefeldbegrenzenden pleistozänen Rinnen, häufig mit Geschiebemergel.

Der **Faktor Technologie** bedingt die Verkipfung bindiger Abraumsedimente vor allem in *oberen Kippscheiben*, mit der Folge, daß die ton- und glimmermineralreichen Hangendschluff-Sedimente mit FeS₂ in deren kohliger Substanz zu maximaler Versauerung des Kippenwassers der *Innenkippe Meuro* um das Jahr 2011 führen (GW-Anstieg von ~ 40 auf 80 m NN). Mit den gleichzeitig maximalen Al-Gehalten > 4 % (Ton-, Glimmerminerale) in der Abraummischung sowie Ti und Co, Ni, Zn werden diese Metalle max. erst in diesem Stadium ins Kippenwasser mobilisiert.

Im *Abraumschüttungskörper Seese-Ost* sind maximale Al-Gehalte der Abraummischung durch die Ton- und Schluffkomponente der karbonathaltigen Geschiebemergel verursacht. Mit dem für die nördlichen Randfelder des Niederlausitzer Braunkohlenreviers charakteristisch geringmächtigen Hangendschluff, verzahnt mit den „Seeser Sanden“, und somit niedrigen FeS₂-Konzentrationen korreliert Al im Gegensatz zu Meuro *negativ* mit FeS₂. Durch die vollständige Pufferung der potentiell freiwerdenden Säure ist eine Mobilisation von Stoffen ins Kippenwasser Seese wenig wahrscheinlich.

V. Porosität - Setzungs- und Sackungspotential der Abraumschüttung

Für die Porosität in der Kippe Seese-Ost und Meuro ist überwiegend eine *Teufenveränderung in 3 Zonen* kennzeichnend. Diese resultiert aus Korngrößenverteilung und Kornpackung/Auflast.

Zone	POROSITÄT	KORNGRÖSSENVERTEILUNG	KORNPACKUNG / AUFLAST
3. ↑ (Hgd.)	maximal (bis 1,5-fach zu Zone 2), reicht in Seese-Ost 15-20 m unter Rasensohle in Meuro 25-30 m	Mischungen von stark bindig bis rollig bedingen weites	die hohe Porosität (lockere Lagerung) dieser Zone nach Jahren „Trockenliegezeit“ spricht gegen konsolidierenden Einfluß versickernder Niederschläge
2. ↑	gering	Korngrößenspektrum	lagerungsdicht entsprechend Ungleichförmigkeit und auflagernder Abraummischung
1. ↑ (Lgd.)	mittel	<ul style="list-style-type: none"> • vergleichsweise enges Korngrößenspektrum • < 15 % Feinkorn (Bedingung für Vorkippenschüttung) 	lagerungsdicht infolge maximaler Auflast

Das vertikale Verformungspotential resultiert *aus den oberen bis 30 m* der Abraumschüttung. In der Konsequenz ergeben sich aus Topographie und Grundwasserflurabstand Kippenbereiche, in denen das aufsteigende Grundwasser das

Korngefüge der locker lagernden Partikel der Abraummischung einregelt und so zur Konsolidierung von **Tieflagen** führt. Typisch z.B. im „Schwenkende“ des Tagebaus durch das dort bei zunehmender Strossenlänge in Aufschwenkrichtung auftretende Massendefizit. Dagegen verbleibt in **Hochlagen** wie dem Tagebau-Drehpunktbereich mit Massenüberschuß 10er m mächtig Abraumschüttung in *lockerer Lagerung*.

VI. Kippenwassersanierung zur Verkürzung der „Nachsorge“

Die praktizierte Sanierungslinie „Schnelles Fluten der Restlochseen mit Fremdwasser“ erfordert nach Flutungsabschluß unabsehbar lange eine *Nachsorge*. Es wird der hydraulische Gradient von Restlochseewasser in die Kippen hinein aufrechterhalten, damit die „Einkapselung“ des sauren Kippenwassers im Kippenkörper gewährleistet ist. Bei „Umkippen“ der Wasserströmung in Richtung Restlochsee (infolge Niedrigwasser) muß nach dem Signal eines ebenfalls unabsehbar lang vorzuhaltenden Monitorings das Restlochseewasser vor Einleiten in die Vorflut behandelt werden. Die Nachsorge ist auf unbestimmte Dauer notwendig, da das insgesamt in den Kippenkörpern vorhandene und nach derartigem Umkippen verbliebene Säurepotential ohne Geologische Kippenerkundung *nicht bekannt* ist.

Um die Nachsorge kostenminimierend, d.h. in einem überschaubaren Zeitraum *abschließen* zu können und die „Schadstoffquelle direkt zu bekämpfen“ wird vorgeschlagen, eine Kombination aus *Alkalisierung* des aufsteigenden sauren Kippenwassers *in der Kippe* und – da zeitweilige Gradienten und Stoffströme zum Restlochsee unvermeidbar sind - Behandlung *im Restlochsee* vorzunehmen. Mit der *aus der Geologischen Kippenerkundung gewonnenen* räumlichen Verteilung von FeS_2 und CaCO_3 , der abgeleiteten pH-Entwicklung des Kippenwassers beim Grundwasseranstieg und den Durchflußeigenschaften können die Maßnahmen für eine optimale Wirkung gesteuert werden:

1. **Dosierung** des Alkalisierungsmittels bzw. Herstellung eines geeigneten Milieus, z.B. für eine „aktive Bakterienbarriere“ zur Sulfatreduktion. Die Dosierung richtet sich nach der Bilanz aus *Säure- und Pufferpotential*, vorgesehenem *Behandlungszeitraum* und *Grundwasserdurchstrom*.
2. **Plazierung** des Alkalisierungsmittels in möglichst geringer Tiefe (Kosten), jedoch *unterhalb* des Bereichs der Kippe mit maximalem Säurepotential. Das Alkalisierungsmittel ist dort *flächig* einzubringen, um maximale Sediment-Wasser-Interaktion mit dem aufsteigenden Kippenwasser und Verteilung im Kippenraum zu erreichen.

Die Pufferwirksamkeit des Alkalisierungsmittels ist nach Kölling (1990) und Hülmeier (2002) am größten, wenn es am Ende der „Fließstrecke“, d.h. hier im aufsteigenden sauren Kippenwasser im Kippenkörper oben plaziert ist. Die kippentechnologisch bedingt in oberen Scheiben verkippten karbonatführenden Geschiebemergel bieten somit günstige Voraussetzungen für die *Pufferwirkung des Abraumsediments selbst*.

3. Die **Terminierung** vor Erreichen des Kippenteufenintervalls mit maximalem Versauerungspotential durch den Kippenwasserspiegel, um die *Verteilungswirkung* des aufsteigenden Wassers zu nutzen.
 4. Geeignete **Aufteilung** von Behandlung *Abraummischung* bzw. *Restlochseewasser*. Bei pH-Erhöhung $> 4,5$ im aufsteigenden Kippenwasser bilden sich $\text{Fe}(\text{OH})_3$ -Krusten, auch um Sulfidpartikel (Holmström et al. 1999), so daß die Pyritoxidationsrate vermindert wird. Diese zusätzliche hemmende Wirkung der Alkalisierung *in der Abraummischung* auf die „Pyritoxidation“, kann aber bei der Behandlung des Seewassers mit Alkalisierungsmitteln nicht genutzt werden.
-

VORWORT**ZUSAMMENFASSUNG****INHALT**

1	PROBLEMSTELLUNG UND ZIELSETZUNG DER ARBEIT	1
1.1	AFB-Innenkippen des Braunkohlentagebaus und wiederaufgehendes Grundwasser – Notwendige Rauminformation über die Eigenschaften der Abraummischungskörper zur Lösung von bodenmechanischen, geohydraulischen und Problemen der Wasserbeschaffenheit	2
1.2	Grenzen der bisherigen Vorgehensweise der Parameterermittlung führen zum Geologischen Erkundungsansatz	6
1.3	Der Ansatz der Geologischen Kippenerkundung aus der Geologischen Erkundung von Rohstoffkörpern.....	16
1.3.1	Zur Bewertung der Erkundungsaufwendungen - Veranlassung	19
2	FAKTOREN DER ENTSTEHUNG VON AFB-INNENKIPPEN	20
2.1	Geogener Faktor – Regionale geologische Verhältnisse	22
2.1.1	Geologie des Niederlausitzer Braunkohlenreviers	23
2.1.1.1	Das Prätertiär.....	26
2.1.1.2	Das Tertiär.....	27
2.1.1.3	Das Quartär	33
2.1.1.4	Quartärgeologische Zonen des Niederlausitzer Braunkohlenreviers – Untersuchungstagebau 41	
2.2	Technogener Faktor – Abgrabung und Verkipfung des Deckgebirges mit Abraumförderbrücken (AFB) zur Freilegung des Braunkohlenflözes	43
2.2.1	Entwicklung der AFB-Innenkippen – Haupttrichtungen im Förderbrückentagebau	43
2.2.2	AFB-Innenkippen – Außenkippen aus Aufschlußabraum	45
2.2.3	Das „Aufwachsen“ der Abraumschüttung – Kippenstrukturmerkmale	46
2.2.4	Abraumschnitte – Kippscheiben, Kohleeintrag in die Kippe.....	47
2.3	Faktor Kinetik und Sedimentologie des Schüttungsvorgangs	49
3	METHODE DER GEOLOGISCHEN KIPPENERKUNDUNG.....	50
3.1	Vorarbeiten.....	50
3.2	Trockenkern- und Spülbohrungen, Bohrlochmessungen.....	51
3.3	Bemusterung und Beprobung	58
3.4	Analytik.....	61
3.5	Kennzeichnung der Parameterveränderung im Kippenkörper.....	62
3.5.1	Teufenprofile der Parameter – Bohrungen in Strossen- und Aufschwenkrichtung	63
3.5.2	Konstruktion kippengeologischer Profilschnitte.....	63
3.5.3	Raubild –Intervalle des Grundwasserwiederanstiegs.....	66
4	DECKGEBIRGS GEOLOGIE - BAUSCHEMA DER AFB-INNENKIPPEN	69
4.1	AFB-Innenkippe Tagebau Seese-Ost.....	69
4.2	AFB-Innenkippe Tagebau Meuro (Teilfeld Großbräschen)	76

5 GEFÜGEEIGENSCHAFTEN DER ABRAUMSCHÜTTUNGSKÖRPER.....82

5.1	Auswirkungen des Schüttungsgefüges in den AFB-Innenkippen auf bodenmechanische Eigenschaften und Vorgänge beim Wiederaufgehen des Grundwassers.....	82
5.2	Korngrößenverteilung	88
5.2.1	Korngrößensummenkurven der Abraumschüttungen	89
5.2.2	Korngrößencharakteristik der Abraumschüttungen	89
5.2.3	Mediankorndurchmesser M_d [mm].....	89
5.2.4	Ungleichförmigkeitszahl U [-]	90
5.3	Feinkornanteil (Fraktion < 0,063 mm).....	92
5.3.1.1	Kalibration des GAMMA-Logs (GR-BLM) zur Anzeige des Feinkornanteils.....	93
5.3.1.2	Verteilung des Feinkornanteils im Abraumschüttungskörper Seese-Ost.....	95
5.3.1.3	Verteilung des Feinkornanteils im Abraumschüttungskörper Meuro	97
5.3.1.4	Zusammenfassung Fraktion < 0,063 mm	98
5.4	Hydraulische Leitfähigkeit	99
5.4.1.1	Ermittlung des Durchlässigkeitsbeiwertes aus Parametern der Korngrößenverteilung	103
5.4.1.2	Die Durchlässigkeitseigenschaften im Abraumschüttungskörper Seese-Ost.....	104
5.4.1.3	Die Durchlässigkeitseigenschaften im Abraumschüttungskörper Meuro	105
5.4.1.4	Zusammenfassung Durchlässigkeitsbeiwert k_f	106
5.5	Dichte – Porosität - Lagerungsdichte	108
5.5.1	Dichte	109
5.5.1.1	Einfluß der Korngrößenverteilung auf die Dichte der Abraumschüttung	110
5.5.1.2	Verteilung der Dichte ρ_{HOR} im Abraumschüttungskörper Seese-Ost	117
5.5.1.3	Verteilung der Dichte ρ_{HOR} im Abraumschüttungskörper Meuro.....	118
5.5.1.4	Merkmale der vertikalen Dichteänderung.....	119
5.5.2	Porosität	121
5.5.2.1	Die Porosität im Abraumschüttungskörper Seese-Ost	123
5.5.2.2	Die Porosität im Abraumschüttungskörper Meuro	124
5.5.3	Porosität zur Ermittlung der Durchlässigkeit ?	124
5.5.4	Lagerungsdichte	125
5.6	In Abbaurichtung geneigte Wechschelichtung	127

6 STOFFLICHE EIGENSCHAFTEN DER ABRAUMMISCHUNGSKÖRPER133

6.1	Die petrographischen Komponenten der Abraummischung zur Kennzeichnung des „Reaktionskörpers Kippe“	133
6.1.1	Korngrößenmerkmal und Elementgehalte.....	135
6.2	„Kohlekomponente“ (Kohle, kohlige Substanz) – Gesamtkohlenstoff.....	136
6.2.1	Chemische Zusammensetzung der Braunkohle – Bedeutung für den Chemiesmus der Abraummischung	136
6.2.2	Verteilung Gesamtkohlenstoff im Abraumschüttungskörper Seese-Ost.....	143
6.2.3	Verteilung Gesamtkohlenstoff im Abraumschüttungskörper Meuro	144
6.2.4	Gesamtschwefel	145
6.2.5	Ermittlung der Gehalte an Eisendisulfid FeS_2	150
6.2.6	Verteilung von Gesamtschwefel und FeS_2 im Abraumschüttungskörper Seese-Ost.....	154
6.2.7	Verteilung von Gesamtschwefel und FeS_2 im Abraumschüttungskörper Meuro	155
6.2.8	Eisen.....	157
6.2.9	Kobalt, Nickel und Zink.....	165
6.3	„Ton- und Glimmermineralkomponente“ – Aluminium.....	176
6.3.1	Ton- und Glimmerminerale unter Säureeinwirkung – Tone als Ionenaustauscher, Zwischenpuffer	178
6.3.2	Aluminiumgehalte - Spülbohrungen	181
6.3.3	Verteilung von Aluminium im Abraummischungskörper Seese-Ost.....	184

6.3.4	Verteilung von Aluminium im Abraummischungskörper Meuro	185
6.3.5	Titan	185
6.4	„Kalkkomponente“ (Karbonat) – Calcium	189
6.4.1	Calciumgehalte – Spülbohrungen	194
6.4.2	Verteilung von Calcium im Abraummischungskörper Seese-Ost.....	196
6.4.3	Verteilung von Calcium im Abraummischungskörper Meuro	197
6.4.4	Mangan.....	198
7	„REAKTIONSKÖRPER AFB-INNENKIPPE“	204
7.1	Hydrogeochemische Reaktionen in den Abraummischungskörpern - Szenario für den Ablauf der Versauerungs- und Folgereaktionen	205
7.1.1	Ausgangssituation	205
7.1.2	Reaktionen in der „Trockenliegezeit“	206
7.1.2.1	Bildung einer Eisenanreicherungszone	209
7.1.2.2	Vertikalzonierung der Kippe vor dem Grundwasserwiederanstieg	210
7.1.3	Entwicklung der Kippenwasserbeschaffenheit beim Aufgehen des Grundwassers.....	214
7.1.3.1	Grundwasseranstieg (unterer Teil)	215
7.1.3.2	Reaktionen im anaeroben Milieu	218
7.1.3.3	Grundwasseranstieg (oberer Teil)	219
7.2	Die AFB-Innenkippen Tagebau Seese-Ost und Tagebau Meuro im Rahmen der Regionalen Hydrogeologie der Niederlausitz	220
7.2.1	Regionale Hydrogeologie der Niederlausitz	220
7.2.2	Hydrogeologische und hydrologische Merkmale der Tagebaue - vorbergbaulich - postmontan.....	226
7.2.2.1	Seese-Ost.....	226
7.2.2.2	Meuro	233
7.3	Der Anstieg des Grundwassers in die AFB-Innenkippe Seese-Ost.....	236
7.4	Der Anstieg des Grundwassers in die AFB-Innenkippe Meuro.....	241
7.5	Schlußfolgerungen – Die Kennzeichnung des „Reaktionskörpers AFB-Innenkippe“ für nachhaltige Sanierungsmaßnahmen zur Wiedernutzbarmachung der Bergbaufolgelandschaft.....	245
7.5.1	Die langfristige Auswirkung der Kippenwasserbeschaffenheit	245
7.5.2	Praxis der Sanierung des Wasserhaushalts und Nachsorge, Rekultivierung.....	246
7.5.3	Geologische Kippenerkundung – Kippenwasserbeschaffenheit	248
7.5.4	„Nachsorge Schnell gefluteter Restlochseen“ auf unbestimmte Zeit	249
7.5.5	Dosierung und Platzierung kippenwasserverbessernder Maßnahmen zur Verkürzung der Nachsorgedauer „Schnell gefluteter“ Restlochseen.....	251
7.5.5.1	Monitoring	252
7.5.6	Geeigneter Zeitpunkt für die Geologische Kippenerkundung als Grundlage für bergbauliche Sanierungsmaßnahmen	253
7.5.7	Präventivmaßnahmen	255
8	LITERATUR	256
9	INHALT ANLAGENHEFT UND ANLAGENBAND	266

1 Problemstellung und Zielsetzung der Arbeit

Bei der Gewinnung von Braunkohle im trockenen Tagebaureaum kommt es durch die Umlagerung des Flöz-Deckgebirges zu einem *Neuaufbau des Geologischen Schichtenmaterials* in der AFB-Innenkippe. Nach Auskohlung bzw. Stillsetzung des Tagebaus und Einstellung der Sumpfung, trifft das wiederaufgehende Grundwasser auf eine *Mischung* der Deckgebirgsschichten mit den petrographischen, stofflichen und petrophysikalischen *Eigenschaften* dieses geo-technogenen Abraumschüttungskörpers.

Für die Wechselwirkung zwischen dem Sediment der Abraummischung und Wasser sind wesentlich:

- das *geochemische Milieu* infolge „Sulfidoxidation“ (Versauerung, Folgereaktionen)
- die *hydraulischen Eigenschaften* (GW-Standsentwicklung/Flurabstände, Stofftransport)
- die *lockere Lagerung* des geschütteten Materials (verminderte bodenmechanische Stabilität).

Ausmaß und Zeit der im Laufe des Grundwasserwiederanstiegs eintretenden *Beeinträchtigungen* hängen von der *Verteilung dieser Eigenschaften im Raum* der AFB-Innenkippenkörper ab, die daher für die Prognose der Wirkungen und Plazierung von Gegenmaßnahmen bekannt sein muß.

- Die *Versauerung* des Kippenwassers wird dort dominieren, wo versauernde Bestandteile der Abraummischung in Konzentrationen vorhanden sind, die *nicht gepuffert* sind.
- Die *Verlagerung der Reaktionsprodukte* (Stoffausbreitung) erfolgt durch die Grundwasserströmung, in der Richtung und Geschwindigkeit abhängig von den hydraulischen Eigenschaften.
- Bereiche unterschiedlicher *Standssicherheit bzw. Tragfähigkeit* von Kippenböschungen und -flächen werden durch die unterschiedliche Korngefügelagerung und dessen Änderung durch das aufgehende Grundwasser bestimmt.

Wie die Diskussion bisheriger Arbeiten zur Lösung der Prognoseaufgaben, z.B. der Gewässergüteentwicklung in vom Kippenwasser beeinflussten Restlochseen im nachfolgenden Kapitel zeigt, gelingt es *mit den bisher angewandten Vorgehensweisen nicht*,

die für die Bemessung der Vorgänge beim Grundwasserwiederanstieg notwendige Rauminformation zu erhalten.

Um zu *orts-* und mit den Stadien des Grundwasseraufstiegs *zeitkonkreten* Aussagen zu kommen, ist das Ziel dieser Arbeit, aus den Erkundungsverfahren für natürlich entstandene Sedimentgesteinskörper eine *Methode* abzuleiten, mit der die Eigenschaften der Abraummischung und ihre Veränderung im Kippenraum bestimmt werden können.

Grundüberlegung für Ansatz und Entwicklung der *Geologischen Kippenerkundung* ist, die AFB-Innenkippe als *geo-technogenen Körper* zu sehen, bei dem aufgrund des gerichteten Schüttungsvorgangs die räumliche Mischungs-Veränderung des abgegrabenen *Geologischen Materials* erkundungsmethodisch *mit Bohrungen*, d.h. Kernbohrungen und Spülbohrungen mit geophysikalischer Bohrlochmessung zu erfassen sind.

Der mit der Arbeit aufzuzeigende Weg der *Geologischen Kippenerkundung*, um zur Raumverteilung stofflicher Zusammensetzung und hydraulischer Parameter zu kommen, ist die Grundlage für *benachbarte Fachdisziplinen*, um unter Berücksichtigung der geohydraulischen Verhältnisse für die Kippenkörper im System der Bergbaufolgelandschaft Stoffumsatz- und Stoffausbreitungs-Modelle zu entwerfen und zu berechnen.

Mit den Erkundungsergebnissen für zwei Abraumschüttungskörper und als Grundlage für sanierungsbergbauliche Maßnahmen soll die *Entwicklung der Kippenwasserqualität* angegeben werden, wie sie aus der Verteilung der FeS₂- und CaCO₃-Konzentrationen in den Grundwasser-Aufstiegs-Zeitscheiben der Innenkippen resultiert.

1.1 AFB-Innenkippen des Braunkohlentagebaus und wiederaufgehendes Grundwasser – Notwendige Rauminformation über die Eigenschaften der Abraummischungskörper zur Lösung von bodenmechanischen, geohydraulischen und Problemen der Wasserbeschaffenheit

Es bestehen *drei Problemgruppen* infolge Wiederanstiegs des Grundwassers. In den Kippen selbst und beeinflusster Umgebung wie den Restlochseen kommt es zu bodenmechanischen, geohydraulischen und hydrogeochemischen Effekten, deren *Ausmaß* für die Beherrschbarkeit/Regelbarkeit der Wirkungen prognostiziert werden muß, festgelegt im Bundesberggesetz.

1.) Verminderte Standsicherheit von Kippenböschungen und -flächen

Die *Gefährdung* der Böschungsstabilität durch den beim Grundwasserwiederanstieg wirksamen Auftrieb sowie Setzung, Sackung, Setzungsfließen/Fließbrutschung wird durch die

Sedimenteigenschaften der locker geschütteten Abraummischung (Korngrößenverteilung, Kornform), *Wasserstandsverhältnisse* und die *Lagerungsdichte* der Schüttmassen bestimmt.

Um die Kippenböschungen *gegen großräumiges Setzungsfließen/Fließbrutschung* zu sichern, werden sogenannte „*Versteckte Dämme*“ mittels Rütteldruck- oder Sprengverdichtung hergestellt. Der *Nachweis* des Verdichtungserfolgs ist Voraussetzung zur Beendigung der Bergaufsicht für diese Flächen. Die bisherige Nachweispraxis mit *Drucksondierungen* liefert punktuelle Information. Räumliche Information versuchen Schmitz & Friedrich 2000 durch seismische Verfahren zu gewinnen.

Hallbauer 1981 zeigt anhand erheblicher *Unterschiede des Setzungsbetrages* in verschiedenen Bereichen der AFB-Kippe Welzow-Süd die Bedeutung der Zusammensetzung der Abraummischung, welche somit für Setzungsprognosen neben den geometrischen Verhältnissen des Kippensystems (verursacht in der Kippentechnologie) erkundet werden muß. Teilweise sind setzungsgefährdete *Innenkippenflächen* zu verdichten, Thiemig (mdl. Mittlg.) 1/2002.

Für die ortskonkrete Beurteilung der Gefährdung und stabilisierende Maßnahmen *müssen* die o.g. Sedimenteigenschaften der Schüttung in den Kippenmassiven *bekannt sein*, Förster et al. 1989, Freytag & Michael 1994. Für *Kippenflächen als Baugrund* muß die *Tragfähigkeit* bauwerksweise erkundet und entsprechend der geplanten statischen oder dynamischen Belastung verbessert werden, Hallbauer 1981, Striegler & Göbel 1985, Hausdorf 1997.

2.) Nicht bekannte hydraulische Eigenschaften der Kippenmassive

Die Durchlässigkeit der Abraumschüttung muß zur *Dimensionierung des Grundwasserwiederanstiegs-Regimes* (ohne Porenwasserüberdruck, Kaubisch 1986) in den Kippenmassiven bekannt sein, damit die *Kippenfläche* für Sanierungs- und Rekultivierungsarbeiten betretbar sowie die *Kippenböschungen* standsicher gehalten sind.

Die Strömungsverhältnisse in und um die Kippen müssen über die Zeit des Grundwasseranstiegs hinaus bekannt sein. Die Durchlässigkeit des neu entstehenden Sedimentkörpers AFB-Innenkippe im *Anstrom* des Grundwassers im Verhältnis zum angrenzenden „gewachsenen Gebirge“ bestimmt den Grundwasserdurchfluß und damit *Grundwasserspiegelverlauf* und Gefährdung durch *Vernässungen* auf der Anstromseite der geringerdurchlässigen Kippe, Fischer & Kaubisch 1992.

Geländesenkung innerhalb des Absenktrichters und resultierend Verminderung von Durchfluß, Gebietsentwässerung und Flurabstand des Grundwassers zeugen von der *Wirkung*

auf kippenangrenzendes Gebiet. Die Fließgeschwindigkeit als Faktor für innere Erosion und Suffosion, häufig Initial von Setzung und Fließbrutschung deutet auf den *Zusammenhang* zwischen hydraulischen Verhältnissen in den Kippen und ihrer bodenmechanischen Stabilität .

Zur Beurteilung der Grundwasserdurchströmung von Kippenkörpern, bei denen das Richtungsmerkmal mit im Vordergrund steht, muß die *räumliche Verteilung der Durchlässigkeit bekannt sein*.

3.) Negative Beeinflussung der Wasserbeschaffenheit durch „Pyritoxidation“

Dem Bergbautreibenden ist aufgegeben, *Nebenbestimmungen zur Kippenwassergüte* einzuhalten. Dazu führt er Grundwassermonitoring, Prognose der Kippenwasserbeschaffenheit, nötigenfalls Gegenmaßnahmen und deren Prüfung auf Erfolg durch, Arnold & Mietsch 2000.

Die Bearbeiter dieser Problematik gehen von folgendem Ablauf aus - Oxidation des Sulfids in den Deckgebirgssedimenten durch Luftzutritt beim Tagebauprozess – Aufnahme der Reaktionsprodukte aus dem geschütteten Abraum ins versickernde Niederschlagswasser und das aufgehende Grundwasser - *Versauerung* des Kippenwassers - Lösung/Freisetzung von im Abraum enthaltenen Stoffen *ins abströmende Grundwasser* und Verbrauch von Pufferkapazität des Untergrunds – Fällungsreaktionen - Wisotzky 1994, Rolland et al. 1998b, Berger 2000.

Außer dem Grundwasser werden *Oberflächengewässer* beeinflusst, insbesondere die kippenangrenzenden Restlochseen. Es gilt das Verbot des Anschlusses „saurer“ Seen ($\text{pH} < 6,5$) an die Vorflut. Für den Umfang der Reaktionen und Bilanz der *Immission ins abstromige Grundwasser* muß das „*reagierende Stoffinventar*“ bekannt sein, cit. o.g. Bearbeiter. Für diese Quantifizierungsaufgabe ist zu berücksichtigen, daß die reagierenden Sedimentkomponenten aufgrund geologischer, gewinnungs- und verkipfungstechnologischer Gegebenheiten *nicht gleichmäßig verteilt* in den Kippenkörpern vorkommen.

Versauerung und Folgereaktionen werden in Abhängigkeit von der relativen *Lage* unterschiedlich reagierender Bereiche in der Kippe ablaufen. Zu dem *räumlichen Faktor* der lateralen Verteilung kommt durch die vertikale stoffliche Gliederung der bis über 60 m mächtigen Schüttungskörper der *zeitliche Aspekt*, d.h. wann im Laufe des Grundwasserwiederanstiegs die *Reaktionsbereiche* im Kippeninneren erreicht werden. Für die Prognose der Wasserbeschaffenheitsentwicklung muß die *Verteilungscharakteristik der stofflichen Parameter im Reaktionskörper Kippe* bekannt sein.

1.2 Grenzen der bisherigen Vorgehensweise der Parameterermittlung führen zum Geologischen Erkundungsansatz

Zur Lösung von Fragestellungen aus den drei Problemgruppen ist die *Rauminformation* über die Verteilung der interessierenden Kennwerte in den Kippenkörpern erforderlich.

Die Bearbeiter (s.u.) *erkennen diese Notwendigkeit*, ziehen aber nicht die Konsequenz einer systematischen Erkundung der *räumlichen Kennwertverteilung*. Zum Teil unterstreichen sie die Bedeutung der räumlichen Parameterverteilung, halten sie aber für nicht erreichbar.

- ... „wäre zur Prognose ... eine möglichst weitreichende Kippeninventarisierung wünschenswert. Die räumliche Ausdehnung der Kippenflächen und deren Heterogenität stehen diesem Bestreben jedoch entgegen und machen eine systematische Erfassung durch Beprobung unmöglich“, Rolland et al. 1998a, die aus einer Anstehendbeprobung auf die gesamte Kippe extrapolieren,
- „nicht möglich, kf zukünftiger Kippen anzugeben“, Reichel et al. 1992,
- gehen von „idealisierter Kippenstruktur“ aus, Prein & Mull 1995, Rolland et al. 1998a,
- „Die Acidität einer Kippe kann nicht durch Laborversuche, sondern nur durch geeignete geochemische Geländeuntersuchungen ermittelt werden“, Wisotzky & Kringel 1998.
- „... neu strukturierte Körper entstanden, die sich hinsichtlich der räumlichen Verteilung der unterschiedlichen Stoffparameter jedoch nur ungenügend beschreiben lassen“, Meinert & Storz 2000,
- „Eine detaillierte Beprobung zur Quantifizierung der Stoffbestände wird weiterhin unumgänglich sein“, Meinert & Storz 2000.
- „Notwendigkeit der Vorfeldbilanzierung zum Verständnis der sich entwickelnden hydrogeochemischen Verhältnisse der Kippen“, Sames/Hoth/Kringel 2000,
- „Das erforderliche Bohrungs-/Beobachtungsnetz ist ökonomisch nicht realisierbar“, Carstensen & Pohl 2000,
- „Der notwendige Erkundungsaufwand ist erheblich“, Schöpke et al. 2002.

Im Ergebnis ihrer *Schlußfolgerung*, daß mit einer Beprobung der Kippenkörper nicht die Variabilität der Parameter und erst recht nicht die räumliche Verteilungscharakteristik zu erfassen sei, versuchen die Bearbeiter der Kippenproblematik, dies mit anderen *Verfahren* zu

erreichen. Teilweise werden Fragestellungen wie die „Ermittlung eines mittleren Pyritumsetzungsgrades“ oder der „Pyritumsetzungsrate in verschiedenen Lithologien“ als Ansatz der Quantifizierung z.B. des Versauerungspotentials in den Vordergrund gestellt.

Zur Ermittlung der Kippeneigenschaften *ohne den Geologischen Aufschluß des Kippeninneren* werden hauptsächlich zwei Ansätze, auch kombiniert, verfolgt.

1. Nutzen von Informationen aus der *Erkundung der Braunkohlenlagerstätte*,
2. Extrapolation von der *Kippenoberfläche* auf das Kippeninnere.

ad 1: Die **Ergebnisse der Vorfelderkundung** werden auf unterschiedliche Weise genutzt. Analog zur Materialauswahl bei den Abraumschnitten für eine standsichere und tragfähige Vorkippenschüttung (< 15 % bindige Bestandteile) des laufenden Tagebaus, verwendet Kaubisch 1986 die im *Vorfeld* für die Schichtglieder des Flöz-Deckgebirges bestimmten *Korngrößenverteilungen*, abraumschnittweise gemischt zum Übertrag auf *kf*-Werte in den, Vorfeldflächen entsprechenden Kippenbereichen, „kf-Kennwertmodell“.

Berger 2000, verwendet für ein stoffliches Kennwertmodell die *Mächtigkeiten* aus der Vorfelderkundung, verknüpft sie mit den aus Tagebauunterlagen *rekonstruierten Übergängen* vom „Abraumschnitt (Deckgebirgsschichten) zu Kippscheiben (Abraummischung)“ und *Elementgehalten* der Deckgebirgsschichten aus einem Anstehend-Aufschluß (Baggerböschung).

Auch beim noch relativ „direkten Vorgehen“ von Kaubisch für die Korngrößenverteilungen ist nach Bilz 1971 anzumerken: „Die Verwendung von im Rahmen der Vorfelderkundung am gewachsenen Schichtenprofil gewonnenen Korngrößenverteilungen ist für eine Bewertung der Korngrößenverhältnisse in den Kippenmassiven und dort herrschende Durchlässigkeit nicht machbar und die Bestimmung an Kippenmaterial selbst unumgänglich“.

ad 2: Informationen über **Eigenschaften der Abraummischung an der Kippenoberfläche** werden über Fernerkundungs- und oberflächengeophysikalische Verfahren gewonnen, Kaubisch 1986, Rolland et al. 1998b, Buczko 1999, Reinhäkel et al. 2000, Berger 2000.

Mit *Fernerkundung* von Kippenoberflächen und einer Kalibration im Kippengelände ist die qualitative Ansprache der dort geschütteten Abraummischung möglich, Kaubisch 1986. Das Verfahren kann für Kippbodenkartierungen sowie z.B. die nutzungsbestimmte Abgrenzung von Kippenflächen eingesetzt werden. Die Extrapolation von der

Kippenoberfläche über Gefüge-, Lagerungs- und stoffliche Eigenschaften im Kippeninneren *ist nicht möglich*.

Geoelektrik ermöglicht Aussagen über den Verlauf der von der Kippenoberfläche durch die Versickerung von Niederschlagswasser in die Kippe *vordringenden* „*Pyritoxidationsfront*“. Die für AFB-Kippen charakteristische, in Abbaurichtung geneigte Wechsellagerung unterschiedlich sulfidhaltiger und durchlässiger sowie unterschiedlich aufmineralisierter und leitfähiger Schüttungsschichten wird im Widerstandsverlauf abgebildet, Lange 1974, Berger 2000, Meinert & Stortz 2000. Der Einfluß des Ton- und Wassergehalts (Niederschlag/Verdunstung, Speichervermögen Sediment) auf die Widerstandsmessung macht die Kalibration mit zeitnah entnommenen Bohrkernproben notwendig, um den Widerstandsänderungen *Tiefenlagen* zuordnen zu können.

Die von Buczko 1999 bis in 7 m Teufe „*gemessenen Georadar-Muster* zeigen qualitative Ähnlichkeiten mit der simulierten Verteilung der hydraulischen Parameter, jedoch ist die räumliche Korrelationsstruktur von Georadar-Reflexionen und hydraulischen Eigenschaften *nicht äquivalent*.“

Außer den Arbeiten, die entsprechend der Bedeutung der räumlichen Verteilung der beim Grundwasserwiederanstieg wirksamen Kippeneigenschaften diese zu ermitteln versuchen, befassen sich zahlreiche Arbeiten mit den ***hydrogeochemischen Vorgängen von Stoffumsatz und Transport***, der Modellierung der „Pyritoxidation“ und Folgereaktionen der Säurefreisetzung, Pufferung, dem Lösungsverhalten und den Migrationsformen von Stoffen in Sicker- und Porenwässern sowie Mineralum- und -neubildungen oder z.B. mit leichter als aufwendigen Verwitterungsversuchen zu bestimmenden *Bilanz* aus Säurebildungs- und Pufferpotential, Schöpke et al. 2002. Die Untersuchungen zur Reaktionskinetik gehen im wesentlichen auf Kölling 1990, Obermann 1991 als neuere Bearbeitungen der Problematik aus der „Pyritoxidation“ zurück. Bei beiden stand die aus Säulen- bzw. Tonnenversuchen erarbeitete Bemessung einer Kalkgabe zum Abraum als Sanierungsmaßnahme im Vordergrund: Prein, Diss. Hannover 1993, Wisotzky, Diss. Bochum 1994, Cesnovar & Pentinghaus 1998, Grützmacher, Diss. Berlin 1999, Dohrmann, Diss. Leipzig 1999, Knöller, Diss. Leipzig 1999, Brüscke et al. 1999.

Auf die Beiträge von Matschak 1969 zur „***Strukturforschung an Tagebaukippen***“, die u.a. charakteristisch wiederholte Dichtemuster in den Kippen auf die Kinetik des Schüttungsvorgangs zurückführen, wird im Abschnitt „*Faktor Kinetik und Sedimentologie des Schüttungsvorgangs*“ eingegangen. Buczko 1999 greift die von Matschak untersuchte

Regelmäßigkeit der Dichteverteilung, den *höher verdichteten Aufprallbereichen* des Schüttungsstroms auf und versucht in einem Deterministischen Ansatz, die Änderung der Durchlässigkeitseigenschaften hinsichtlich Wasserfluß und Stoffumlagerung im Kippenkörper zu simulieren. Die „simulierten Verteilungen hydraulischer Parameter lassen sich mit geostatistischen Simulationsmethoden ohne zusätzliche Annahmen über die Verkippungstechnologie nur bei einem *unrealistisch engen Meßnetz* nachbilden.“

Vor der Erläuterung der *Merkmale der Geologischen Kippenerkundung* werden die Arbeiten von Kaubisch 1986 und Berger 2000 behandelt. An diesen Dissertationen können die unterschiedlichen *Herangehensweisen* deutlich gemacht werden, mit denen versucht wurde, die *Parameterverteilung in den Kippenkörpern* zu klären, um damit die hydraulischen Verhältnisse und Beschaffenheitsentwicklung des Kippenwassers anzugeben.

Kaubisch, Dissertation Freiberg 1986 - „Zur *indirekten* Ermittlung hydrogeologischer Kennwerte von Kippenkomplexen, dargestellt am Beispiel des Braunkohlenbergbaus“.

Routinemäßig werden *Tagebau-Vorfeldinformationen* genutzt bei der Steuerung der Abbau- und Verkippungstechnologie, d.h. welche Abraumschnittmassen (Anteile *bindiger und nichtbindiger Schichten*) in die Vorkippe und die Hauptkippenschüttungen hinsichtlich der Standsicherheit für Großgeräte (Förderbrückenstütze) zu verkippen sind. Dies ist Ausgangspunkt für Kennwertmodelle der Verteilung von Eigenschaften in den aus der Deckgebirgsfolge geschütteten Kippen.

Kaubisch stellt für Kippengebiete „veränderte Lagerungs-, Grundwasserhaushaltsverhältnisse und hydrogeologische Eigenschaften“ heraus. Als problematische *hydraulische und bodenmechanische Effekte* beim Grundwasserwiederanstieg benennt er:

- hohe Porosität -> *Setzung*
- geringe Scherfestigkeit -> *Setzungsfließen/Fließbrutschung* -> Sanierungsaufwand zur Böschungssicherung.
- *Vernässung* infolge hoher bindiger Anteile, kapillar gehalten -> Sanierungsaufwand für Entwässerung

Für die *Nutzung* dieser Flächen müssen die *hydrogeologischen und bodenmechanischen Verhältnisse* in den Kippen bekannt sein, vor allem hinsichtlich der *Entwicklung des Grundwasserstands*, Parameter ist der kf-Wert. Kaubisch hebt hervor, daß, abhängig von den *Eigenschaften* des Kippenmaterials (Korngrößenverteilung -> kf) und dem *Aufbau* der Kippe

in Kippscheiben Wert und die Verteilung von kf sich *von Kippe zu Kippe unterscheiden*. Damit es nicht zu den o.g. Gefährdungen bei ungeregeltem Grundwasserwiederanstieg kommt, hält er fest, daß *sämtliche Kippen hydrogeologisch zu erkunden* sind. Hinsichtlich der vorgesehenen *Nutzung* (Grundwasserflurabstand, verbleibende Inseln, Vernässung vermeiden oder als „Feuchtbiotop“ angestrebt etc.) muß das kf-Kennwertmodell die Berechnung der zeitlichen und räumlichen *Entwicklung des Grundwasserwiederanstiegs* ermöglichen.

Kaubisch geht auf die gerichtete Veränderlichkeit in *AFB-Innenkippen* ein, zieht jedoch nicht den Schluß einer *Geologischen Erkundung der Kippen*. Er untersucht *direkte und indirekte* Erkundungswege (Bohrungen, Fernerkundung), um zum kf-Kennwertmodell zu kommen. Im Ergebnis seines Kostenvergleichs für den Geologischen Bohraufschluß und indirekte Methoden ist die *Kennwertermittlung aus Vorfelddaten*, ergänzt um *Fernerkundungsdaten* optimal.

Die im Vorfeld für die Schichtglieder des Flöz-Deckgebirges bestimmten Korngrößenverteilungen werden abraumschnittweise gemischt, über empirische Zusammenhänge ein kf-Wert dieser Mischung ermittelt und in die, den Vorfeldflächen entsprechenden Kippenbereiche und Kippscheiben übertragen.

Kritisch zu bewerten, unberücksichtigt, nicht genutzt bzw. nicht belegt bleiben:

- Die Nutzung der Korngrößenverteilung der *Deckgebirgsschichten* aus der Vorfelderkundung für die Durchlässigkeitseigenschaften der *Deckgebirgsmischung* sind nach Ergebnissen Bilz 1971 nicht möglich.
 - Die Lage der *Mischböden aus verschiedenen Abraumschnitten* in der Kippe kann mit diesem Modell der Kennwertermittlung aus Vorfelddaten *nicht abgebildet* werden.
 - Die Extrapolierbarkeit von Ergebnissen der Fernerkundung über die Verteilung des kf in den AFB-Kippen ist nicht möglich. Schweigert 1999 beobachtet *dünne quartäre Decken auf Tertiär-Sediment*, was zu Fehleinschätzungen über den inneren Bau und die Eigenschaften des Kippeninneren führt.
 - *Stoffliche Merkmale* und ihre Veränderung in den Kippscheiben und ihre Bedeutung beim Grundwasserwiederanstieg bleiben unberücksichtigt; somit keine Aussagen zu Reaktionen und Reaktionsablauf.
 - Das kf-Kennwertmodell ist nicht durch dokumentierte Bohrungsergebnisse verifiziert.
-

Berger, Dissertation Cottbus 2000 - „Untersuchung zu Stoffinventar und Stoffänderung durch Redoxreaktionen in Sedimenten des Niederlausitzer Braunkohlereviere – Quantifizierung von Immissionen ins abstromige Grundwasser.“

Aufgabe war die Bewertung der Grundwassergütebeeinflussung und -entwicklung, ausgehend von den Abraumsedimenten Tagebau Welzow-Süd. Berger erarbeitete in Anlehnung an Kaubisch 1986 (kf-Kennwertmodell) ein *stoffliches Kennwertmodell*, das die Verteilung des Eisendisulfids im Kippenkörper wiedergeben soll.

Ein gravierender Unterschied zum Vorgehen von Kaubisch ist: Kaubisch nutzt für das kf-Kennwertmodell die Korngrößenverteilungen aus der Vorfelderkundung im gesamten Tagebaubereich. Berger analysiert für sein stoffliches Kennwertmodell die Zusammensetzung der Geologischen Schichtenfolge an einem Böschungsschnitt des Tagebaus. Für Angaben über die Zusammensetzung der verkippten Deckgebirgssedimente (Versauerungspotential) sowie zur Klärung von Fragen der „Pyritoxidation“ (Reaktionsraten, mittlerer Pyritumsatzungsgrad), führt er Untersuchungen

- 1.) an *Anstehendem*,
- 2.) aus Anstehendem „hergestellter *Abraummischung*“ und
- 3.) an der *Kippenoberfläche* durch.

ad 1: Bestimmung der Gehalte S und C und Bindungsformen S_{di}, C_{anorg} in den „lithostratigraphischen Horizonten“ des Flöz-Deckgebirges an *Proben aus der Baggerböschung* (2-3 kg). Zusammen mit den *Mächtigkeiten* im Tagebaubereich aus der Vorfelderkundung und der detaillierten Zuordnung Abraumschnitt – Abwurf stellt er die Verteilung der S_{di}-Gehalte im Kippenkörper auf.

ad 2: An Abraummischungen je *Abraumschnitt* untersucht er im „Tonnenversuch“, entsprechend Obermann und Wisotzky 1998 das Vordringen der Oxidationsfront in der Zeit. Aus S_{di} im Feststoff und ins Sickerwasser mobilisierten Ionen errechnet er Stoffaustragsraten. Mit dem so ermittelten *Stoffumsatz* und dem *stofflichen Kennwertmodell* (S_{di}) erstellt Berger ein *Strukturmodell* „*Schadherd Tagebaukippe*“ und verwendet dies für die Immissionsprognose für den Grundwasserabstrom.

ad 3: *Fernerkundung* verwendet Berger, um Aufschluß über das Verteilungsmuster der Mischsedimente auf der AFB-Kippenoberfläche zu erhalten und zur Auswahl einer Testfläche für Geoelektrische Messungen (Längs- und Querprofile zur Struktur der Kipprippen). Mit *Geoelektrik* und Bohrproben bestimmt er das Vordringen der „*Oxidationsschicht*“ für

Sedimente unterschiedlicher Abraumschnittbereiche, die an der *Kippenoberfläche* austreichen.

Kritisch zu bewerten, unberücksichtigt, nicht genutzt bzw. nicht belegt bleiben:

- Die *Probenahme* zur Bestimmung von S_{di} erfolgt aus *entwässertem Tagebauvorfeld* (frisch angeschnittene Baggerböschung). Dabei ist weniger der Einfluß der Vorfeldentwässerung auf die enthaltene Stoffe problematisch. So sind im Einflußbereich von Bohrungen der Vorfeldentwässerung mit teilweise Abtransport der Produkte der „Pyritoxidation“ gelegene *Beprobungspositionen* sulfidärmer gegenüber solchen, die nur eingeschränkt diesem Einfluß unterlegen haben. Gravierender ist, daß auch bei Mittelung aus 9 Profilen entlang 400 m Böschung die Angaben im Verhältnis zur *Tagebaufläche Welzow-Süd* auf einem *Punktaufschluß* beruhen und die nur für diesen zutreffende Ablagerungsursächliche Zusammensetzung wiedergeben. Problematisch ist der Übertrag auf das gesamte Braunkohlefeld, in dem lateral fazielle und stoffliche Veränderungen auftreten. Das *stoffliche Kennwertmodell* ist im Vergleich zu dem von Kaubisch, der auf Korngrößenverteilungen der Vorfelderkundung zurückgreifen konnte *nur wenig belegt*.
 - Der Bilanzierung der Freisetzung von Produkten der „Pyritverwitterung“ legt Berger wesentlich den FeS_2 -Gehalt von der Rasensohle bis zur sedimentabhängigen Eindringtiefe der „Oxidationsfront“ zugrunde. Die Konsequenz, die Pyritgehaltserfassung auf diesen Kippenvertikalabschnitt zu konzentrieren führt er jedoch nicht durch.
 - Das Kennwertmodell geht vom *rigorosen Einhalten der Zuordnung Abraumschnitt -> Abwurf* aus, was in der Tagebaupraxis jedoch nicht durchgehend gewährleistet ist.
 - Die Datenbasis für das Kennwertmodell *an der Abbauböschung* während des Abbaus durch Beprobung zu erhöhen, stört den Betrieb i.d.R. soweit, daß es nicht realisiert wird.
 - Die Aufstellung von Kennwertmodellen (Schichtmächtigkeiten aus Vorfelderkundung) stößt nicht zuletzt im Bereich stark schwankender Mächtigkeiten an eine Grenze.
 - Das gezeigte Strukturmodell „Schadherd Tagebaukippe“ ist unrealistisch horizontal. Auf den Zusammenhang zwischen aufgehendem Grundwasser und Lage der Reaktionskomponenten in den Abraummischungskörpern wird nicht eingegangen.
 - Das „stoffliche Kennwertmodell“ wird nicht durch Bohrungen verifiziert.
-

Auf die *Notwendigkeit der geologischen Erkundung* (Feststoff-Analyse) weist folgendes Beispiel einer nicht zum Ziel führenden Einschätzung mit Hilfe *der Grundwasseranalyse*. In einer aktualisierten Bewertung für die Entwicklung der Wasserbeschaffenheit im Bischdorfer und *Kahnsdorfer See*, Tagebau Seese-Ost, BTU 1999 konnten Bohrkernbeschreibungen aus der Geologischen Kippenerkundung vorliegender Arbeit einbezogen werden. Die Grundwasserbeprobung mit im Ergebnis sauren Grundwasser konnte mit den Angaben zur Geschiebemergelführung aus der Bohrkernbeschreibung korrigiert werden. Das saure Grundwasser ist mit dem niedrig liegenden Grundwasserspiegel (fortdauernd Sumpfung) und stattgefundener „Pyritoxidation“ im Kippenbasisbereich der nichtabgegrabenen xylitischen schwefelkieshaltigen Kohle zu erklären.

Im *Resümee* bleiben die Bearbeitungen bodenmechanischer, geohydraulischer und hydrogeochemischer Teilproblemstellungen von AFB-Innenkippen im Zusammenhang mit dem wiederaufgehenden Grundwasser in ihrer Aussagekraft beschränkt, da ihnen die Bestimmung der räumlichen Veränderung der Eigenschaften *nicht zugrundeliegt bzw. nicht gelingt*.

In Tabelle 1 sind Bearbeitungen der Kippenproblematik zusammengestellt, die als Voraussetzung sanierungsbergbaulicher Maßnahmen die räumliche Verteilungscharakteristik entsprechender Kippeneigenschaften zu erreichen suchen.

Methodik*	Autor	Matschak 1969	Hallbauer 1981	Kaubisch 1986	Obermann 1991, Wisotzky 1994	Rolland et al. 1998a	Buczko 1999	Berger 2000	Oehmig, Voigt, G., Voigt, H.-J. 2000
Deckgebirge (Vorfelderkundung)				Schichtmächtigkeiten Korngrößenverteilung		Schichtmächtigkeiten Unterlagen Abraumschnitt -> Kippscheibe	Simulation der Änderung der Korngrößenverteilung in 2D- Schüttungskörper-Profil 22 x 10 m	Schichtmächtigkeiten Unterlagen Abraumschnitt -> Kippscheibe	
Deckgebirge (Tagebau)					Proben „flächendeckend der Braunkohlennebengesteine“ Oberfläche Abbauseite	Proben Oberfläche Baggerböschung (entwässertes Gebirge), bis 7 m horizontal in Böschung hinein		Proben Oberfläche Baggerböschung (entwässertes Gebirge)	
Kippe (Tagebau)	Proben Oberfläche Kippenböschung		Rammsondierungen (-5,6 m) Drucksondierungen (-32 m)		Proben Oberfläche Kippscheiben		Georadar (-7 m Teufe) -> qual. Strukturbild	Kippenoberfläche Fernerkundung Geoelektrik (G.E.) Proben zur Kalibration G.E. -> Vordringen Pyritoxidationsfront	Kippe als geo-technogener Körper (geologisches Material in techn. Lagerung) -> Bohrungen Kippengesamtmächtigkeit - vollständige Kernbeprobung - Messung petrophys. Eigenschaften der Abraummischung in-situ (BLM) - Kalibration BLM
Parameter	Rohdichte		Lagerungsdichte	Korngrößenverteilung -> kf	- Versauerungspotential zur Dimensionierung Kalkbeimischung zum Abraum - freigesetzte Elemente	Sdi, Karbonat Sdi/Sges (Kinetik)	Korngrößenverteilung -> kf	Sdi, Canorg Sdi/Sges (Kinetik)	Gefüge- und Stoffparameter der Abraummischung Konstruktion geologischer Profilschnitte

*zugrundegelegter Aufschlußraum

Tabelle 1-1 Zugrundegelegter Aufschlußraum zur Bestimmung der räumlichen Parameter-Verteilung in den Abraummischungskörpern der AFB-Innenkippen als Grundlage für sanierungsbergbauliche Maßnahmen

Abb. 1-1 verdeutlicht, wie die ...	mit Hilfe ...	die Eigenschaften ...
Geologische Kippenerkundung	des <i>räumlichen</i> Aufschlusses des gesamten Kippenkörpers (Erkundungsbohrungen) ~ 50 m	zur Kennzeichnung der AFB-Innenkippe als Durchfluß- und Reaktionskörper erfasst.
Kippbodenkartierung	der <i>Flächenaufnahme</i> der oberen Kippenzone (Bohrstock) 2 ... 3 m	die Standorteigenschaften und Meliorationsbedarf des Kippenrohbodens bestimmt.
Untersuchung der Standsicherheit von Kippenböschungen	von Drucksondierungen in der <i>Linie</i> Uferbereich zum künftigen Restlochsee	die Lagerungsdichte der lockeren Abraumschüttung, ggf. notwendige Verdichtung und deren Nachweis feststellt.

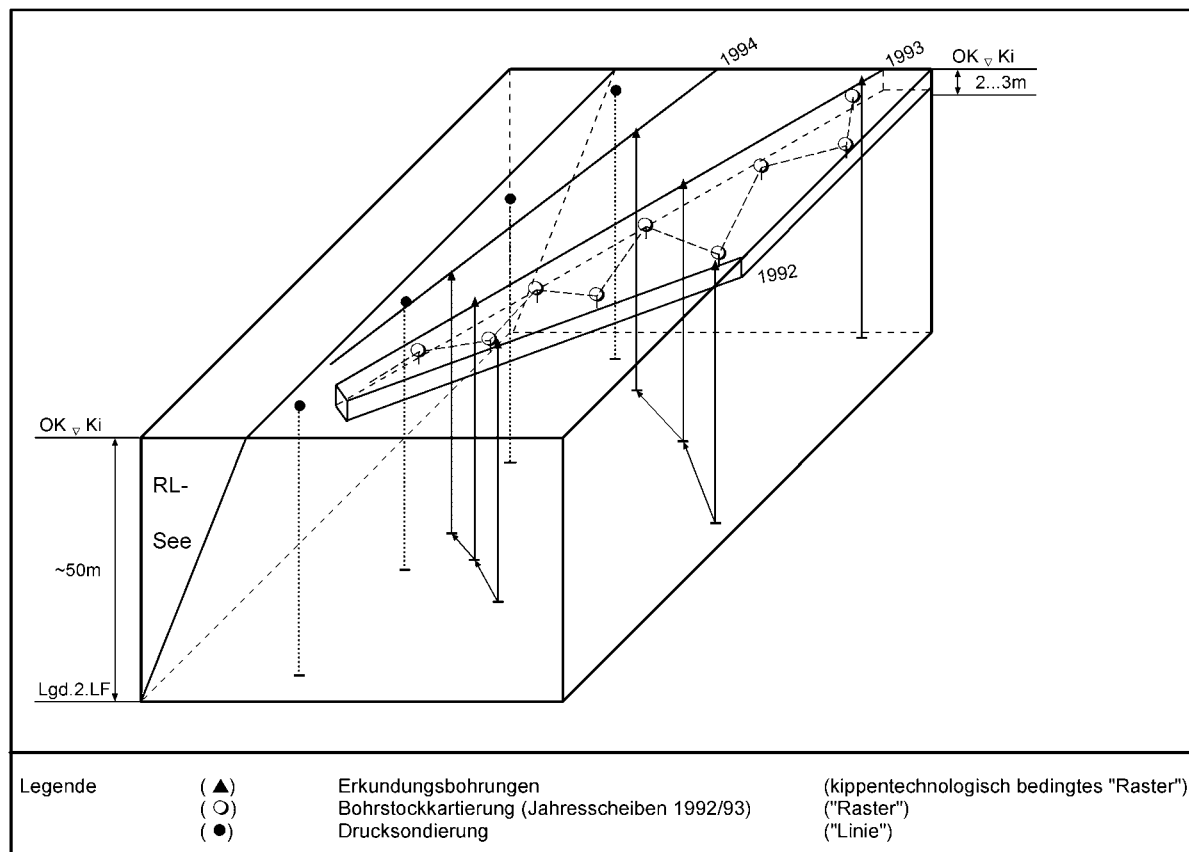


Abbildung 1-1 Schema der Geologischen Kippenerkundung, Kippbodenkartierung und Standsicherheitsuntersuchung in Raum, Oberfläche und Uferlinie Restlochsee von AFB-Innenkippen, nach G. Voigt 2002.

1.3 Der Ansatz der Geologischen Kippenerkundung aus der Geologischen Erkundung von Rohstoffkörpern

Bei den *AFB-Innenkippen* handelt es sich um im *Grundwasserabsenkungstrichter* gelegene Körper, die aus bei der Rohstoffgewinnung anfallendem Nebengestein entstehen. Wie auf der *Erdoberfläche* abgelagerte *Halden* sind sie aus „*Geologischem Deckgebirgs-Material*“ *aufgebaut*, das durch einen bergbautechnologischen Prozeß gemischt in eine neue Lagerung überführt wird.

Entstehung und *Zusammensetzung* derartiger geo-technogener Körper unterscheidet sich gravierend z.B. von *Deponien*, die um Größenordnungen kleiner sind und die aus Abprodukten verfahrenstechnischer Prozesse (Kraftwerksfilterasche, Xylith aus Kohleflöz) und z.B. Siedlungsabfall bestehen. Bei diesen „Altlasten“ ist eine *Bewertung der Auswirkungen* ihres Inhalts mit *indirekten* Verfahren sinnvoll. Basierend auf der *Zusammensetzung* der vom Deponiekörper ausgehenden Wässer kann der Inhalt des als „black box“ aufgefassten Körpers und somit sein Schadstoffpotential beurteilt werden.

Grundüberlegung für die Entwicklung der *Geologischen Kippenerkundung* ist, daß die AFB-Innenkippe als „*Sediment-Geologischer Körper*“ zu sehen ist, bei dem aufgrund genetisch-struktureller Zusammenhänge Wert und räumliche Veränderung der Eigenschaften wie bei natürlichen Geologischen Körpern *erkundungsmethodisch zu erfassen* sind. Dafür wesentliche Merkmale von *Zusammensetzung* und *Entstehung* der Abraumschüttungskörper sind:

- Die Abraumischung ist „*geologisches Material*“, der Kippenkörper hat eine sedimentpetrographische *Zusammensetzung*, die mit dem Instrumentarium der Erkundung, d.h. Gewinnung und Analysen am Bohrkern und Bohrlochmessungen bestimmbar ist.
 - Mit dem Vorgang der Schüttung (quasi *geologischer Ablagerungsprozeß*) bei der Entstehung der Abraumschüttungskörper in steter Wiederholung erhält dieser nachvollziehbare Richtungskomponenten im Aufbau, Struktur.
 - Bei der Entstehung der AFB-Innenkippen wird das Hauptmerkmal des zugrundeliegenden Geologischen Körpers Braunkohlenlagerstätte, nämlich *+/- horizontal lagernder schichtförmiger Aufbau* (Faktor Geologie) durch den „Faktor AFB-Technologie“ in Kippenkörper mit wiederum vorwiegend horizontalen Hauptelementen, den *Kippscheiben* aus Abraumischung überführt. Die *neuen*
-

Eigenschaften des geo-technogenen Lockergesteinskörpers *und deren räumliche Verteilung* sind in der Kombination von Geologie und Technologie begründet.

Die Spezifik der Entstehungsbedingungen für die Abraumkörper des Niederlausitzer Braunkohlentagebaus zeigen die zum *Vergleich* angeführten Merkmale der beiden anderen größeren Braunkohlenreviere Deutschlands. Infolge der unterschiedlichen Mächtigkeit und Zusammensetzung der Deckgebirgsschichten muß die Geologische Kippenerkundung gesondert für die *Reviere* und für *jeden Tagebau (Innenkippe)* durchgeführt werden.

	Rheinisches Braunkohlenrevier	Mitteldeutsches Braunkohlenrevier	Lausitzer Braunkohlenrevier
Deckgebirge			
Mächtigkeit	90 ... 280 m	70 ... 90 m	40 ... 100 m
Zusammensetzung	Quartär: schluffiger Lehm, +- sandig, z.T. karbonathaltig (Löß, Lößlehm, Sandlöß, z.T. mehrere m) Tertiär: Wechsellagerung von Kies, Sand, Ton	Quartär: schluffiger Lehm, +- sandig, z.T. karbonathaltig (Löß, Lößlehm, Sandlöß, bis 1 m mächtig), karbonathaltiger , sandig- toniger Lehm (GMe), sandiger Lehm (GLEhm) Kies (fluv. Schotter) karbonathaltiger toniger Schluff (Bänderton) Tertiär: Feinsand, schluffig, karbonathaltig Ton	Quartär: häufig nur wenige m karbonathaltiger , sandig- toniger Lehm (GMe), sandiger Lehm (GLEhm) Kies (fluv. Schotter) toniger Schluff (Bänderton) Tertiär: Feinsand, Schluffe, Tone, karbonatfrei
Flöz	Miozän	Oligozän	Miozän
Mächtigkeit	10 ... 70 m	10 ... 30 m	7 ... 20 m
Lagerung	durch Verwerfungen stark gestört	söhlig	großflächig, söhlig
Gesamtschwefelgehalt	0,3 %	1,5 ... 2,1 %	0,3 ... 1,1 %
Technologie der Abraumgewinnung- und -umlagerung	Schaufelradbagger	Eimerkettenbagger + Abraumförderbrücke	
Abraumkörper	Kippscheiben mit selektiv gewonnenem Abraum	2 – 5 Kippscheiben mit Mischungen nach Abraumschnitten	

zusammengestellt nach Pflug 1998 und DEBRIV 2001

Der *Faktor Geologie* beinhaltet die petrographische Zusammensetzung und Schichtmächtigkeit der Deckgebirgsschichten und bestimmt vor allem die *lateralen Veränderungen* in den Kippscheiben. Diese folgt der Änderung von Mächtigkeit und Zusammensetzung der Schichten in den Abraumschnitten.

Für das Niederlausitzer und das Mitteldeutsche Braunkohlenrevier mit Abraumumlagerung durch Förderbrückenverbände gilt: Der *Faktor Tagebau-/AFB-Technologie* (Abraumgewinnung – *Abraumschnittmächtigkeit* - und Verkippungsweise der

Abraummischung in *Kippscheiben*) bestimmt die *vertikale Differenzierung* der Kippenkörper und bewirkt die Richtungskomponente im Abraumschüttungskörper.

Die lagerstättegeologischen Merkmale des *epirogenen Typs der Braunkohlenlagerstätten* der Niederlausitz gestatten den wirtschaftlichen Abbau im *Tagebau mittels Förderbrücken*. Die *Erkundung der neu entstandenen AFB-Innenkippen* liefert die Verteilungscharakteristik der Eigenschaften, welche für Prognosen der bodenmechanischen, geohydraulischen und hydrogeochemischen Auswirkungen beim Grundwasseranstieg in die Kippenkörper zur Erarbeitung geeigneter Maßnahmen notwendig sind.

Das *im Grundsatz gleiche erkundungsmethodische Vorgehen*, nämlich mit Hilfe von *Bohrungen* zum geologischen Aufschluß gegenüber Methoden wie Geoelektrik, Bodenradar (beide für Kippenmächtigkeit bis 60 m nicht ausreichend) und Seismik machen die nachstehenden Merkmale möglich. **Fettgedruckt** jeweils Aspekt der AFB-Innenkippe.

- Mächtigkeit des Deckgebirges (+ 2. LF) kohleführende Formation „gering“ (max. wenige 100 m) -> *Teufe der Erkundungsbohrungen wirtschaftlich* (Rohstoffwert, **Sanierungserfolg**),
- Mächtigkeit: beibehalten im Bereich mehrere Dutzend km², vgl. **Kippscheiben**,
- die kohleführende Formation lagert sich weitspannig ab, *großflächige Verbreitung* mit *allmählichen* Veränderungen der Ablagerungsfazies *in lateraler Richtung*. **Umlagerung des Flözdeckgebirges durch die AFB**: Die Änderung der Eigenschaften der verkippten Abraummischung folgt der Änderung der Schichtenfolge in den Abraumschnitten,
- Ausdehnung *in der Fläche wesentlich größer* (mehrere km) als in der Tiefe,
- gering NNE-vergente Schichtlagerung, Flöz + Deckgebirge, **Kippscheiben**,
- geringe Flöz-Zahl -> Übersichtlichkeit vertikaler Wechsel, vgl. 2 ... 4 **Kippscheiben**.

Neben den Gemeinsamkeiten mit Geologischen Körpern existieren für die geotechnogenen Abraumschüttungskörper mit dem *Mischungscharakter* ihrer Zusammensetzung, der *lockeren Lagerung* sowie der technisch vorgegebenen *Richtungskomponente* Charakteristika, die mit Bohrraster- und Beprobungsstrategie erste *Besonderheiten* im Konzept der Geologischen Kippenerkundung erfordern.

1.3.1 Zur Bewertung der Erkundungsaufwendungen - Veranlassung

Das *Bundesberggesetz*, schreibt die *Gewährleistung der Sicherheit* der vom Bergbautreibenden beanspruchten und als Kippen entstehenden Flächen vor und zwar weitgehend unabhängig von der direkt vorgesehenen Nutzung, die sich ändern kann.

Gegenstand für die Entwicklung der Erkundungs- und Untersuchungsmethodik vorliegender Arbeit sind die AFB-Innenkippen als *häufigstem Kippentyp* des Niederlausitzer und Mitteldeutschen Braunkohlentagebaus, die erst nach Gewährleistung der Standsicherheit ihrer *Böschungen* und Tragfähigkeit der *Innenflächen* aus der Bergaufsicht entlassen werden können.

Die Notwendigkeit der Gefahrenabwehr aus der *Versauerung* infolge „Pyritoxidation“ ist durch Wasserrecht im Hinblick auf die Beeinflussung der *Oberflächengewässer* und Immissionsschutzgesetz bezüglich des *Grundwassers* gegeben. Die Notwendigkeit, die Grundwasser-Spiegelentwicklung zu kennen und ggf. Maßnahmen vorzunehmen, liegt im Wasserrecht.

Ziel der Geologischen Kippenerkundung ist die *Vermeidung von Schäden* infolge bodenmechanischer Instabilität, unbekannter Grundwasserstandsentwicklung und Wirkung auf die Wasserbeschaffenheit beim Grundwasserwiederanstieg. *Vorteilhaft* für die anzustrebende komplette Lösung der bodenmechanischen, hydraulischen und hydrogeochemischen Probleme ist eine *einheitliche Bewertungsgrundlage*. Dies ist mit der Methode der Geologischen Kippenerkundung gewährleistet, welche die zugrundeliegenden petrographisch-stofflichen und petrophysikalischen Eigenschaften und ihre Veränderlichkeit in den Abraummischungskörpern an jeweils denselben Proben- und Meßintervallen der Schüttungsfolgen erfaßt.

Die zutreffende *Prognose* der Grundwasser-Spiegelentwicklung und der chemischen und bodenmechanischen Reaktionen beim GW-Wiederanstieg, ist wichtig hinsichtlich der *Schutzgüter* Mensch, Tier, Pflanze, Boden, Wasser, Luft und Klima, Landschaft, Kultur- und sonstige Sachgüter, vgl. Helms 1999 und Initiativen für notwendige *Gegenmaßnahmen*:

1. chemischer Grundwasser-Kontamination - Folge der Versauerung durch „Pyritoxidation“ und Mobilisierung von Schwermetallen und Al aus den Sedimenten mit Folgen für aus Grundwasser gewonnenem *Schutzgut Trinkwasser*, regional wie überregional im Abstrom.
 2. Austritt belasteter „Kippenwässer“ in Restlochseen, Vorfluter; *Schutzgut Oberflächengewässer*
-

3. *wasserwirtschaftliche Probleme* aus der Grundwasser-Standsentwicklung wie Trockenfallen von Vorflutern. Geringe Änderungen der Durchlässigkeitsverhältnisse können schnelle und unerwartete *Vernässungen* (Anstrom, Setzung bzw. Sackung) bzw. *Trockenfallen* von Flächen hervorrufen, Konsequenzen für Bebauung.
4. *geotechnisches Gefährdungspotential* – Stabilität *Böschungen*, Stabilität/Tragfähigkeit *Innenflächen* der Kippen, Auftrieb beim Grundwasserwiederanstieg, Porenwasserüberdrücke, Setzungsfließen, ungleichmäßige Setzung unter notwendiger Bebauung.
5. Bodenverunreinigungspotential, *Schutzgut Boden*. Beeinträchtigung der Nutzbarkeit des Bodens (Landwirtschaft, Forstwirtschaft). *Pflanzenwurzeln* erreichen bei flurnahem Grundwasserspiegel den gesättigten Kippenbereich. Auch die aufgebrachte Abschlußschicht wird vom aufgehenden Grundwasser und seiner *Lösungsfracht* aus dem Kippenliegenden beeinflusst. Erfolgreiche Kipp-Bodengeologische Arbeit erfordert die Untersuchung der Substratzusammensetzung tieferer Kippscheiben und ihre Auswirkungen auf den Grundwasser-Anstieg, -Neubildung, -Beschaffenheit und Standsicherheit, Wünsche 1991, Begegnung Kippbodenkartierung – Geologische Kippenerkundung.
6. aus 3.), 4.) und 5.) *Nutzung* dieser Flächen

2 Faktoren der Entstehung von AFB-Innenkippen

Geologische Faktoren und die technologischen Bedingungen der Abraummulagerung bestimmen den *Aufbau und die Eigenschaften der Abraummischungskörper*.

Wie im Abschnitt „Der Ansatz der Geologischen Kippenerkundung aus der Geologischen Erkundung von Rohstoffkörpern“ entwickelt, begründen Merkmale der Braunkohlenlagerstätte einerseits und die Zusammensetzung aus Geologischem Material und der techno-genetisch strukturelle Bau der Abraumschüttungskörper andererseits den Einsatz von Kern- und Spülbohrungen und geophysikalischen Bohrlochmessungen als Geologische Aufschlußverfahren zur Erfassung der Eigenschaften und der räumlichen Veränderung.

Im Folgenden werden die *Faktoren* behandelt, die generell bei der Entstehung von AFB-Innenkippen im Niederlausitzer Braunkohlenrevier wirksam sind.

2.1 Geogener Faktor - Regionale geologische Verhältnisse,

2.2 Technogener Faktor – Abgrabung und Verkipfung des Flöz-Deckgebirges mit Abraumförderbrücken (AFB),

2.3 Kinetik und Sedimentologie des Schüttungsvorgangs.

Die spezifischen geologischen und technologischen Entstehungsbedingungen der für je eine *quartärgeologische Zone* der Niederlausitz exemplarisch erkundeten und untersuchten AFB-Innenkippe werden im Abschnitt „4 Deckgebirgsgeologie-Bauschema der AFB-Innenkippen“ erläutert.

2.1 Geogener Faktor – Regionale geologische Verhältnisse

Endogene und exogene geologische Vorgänge sind an der räumlichen Entwicklung und dem Aufbau der Gesteine in der Niederlausitz beteiligt gewesen und bestimmen deren heutige *Verbreitung*. Die känozoischen regional geologischen Verhältnisse bestimmen als *geogener Faktor* die petrographische Zusammensetzung, Mächtigkeit und Eigenschaften der für die Braunkohlenförderung abzugrabenden Deckgebirgsschichten und den daraus geschütteten Kippenmassiven.

Die Abraumschüttungskörper des Niederlausitzer Braunkohlenreviers sind aufgrund ihres *Flächen- und Raumanteils* im Zusammenhang mit der Grundwasser-Neubildung, -Leitung, und -Beschaffenheit und ihres *besonderen inneren Baus* eigenständige *Elemente* der Niederlausitzer Bergbaufolgelandschaft und des in veränderter Konstellation neu aufgebauten geologischen und hydrogeologischen Untergrunds. Die Behandlung der *Geologie des Niederlausitzer Braunkohlenreviers* erfolgt unter zwei Gesichtspunkten, die hinsichtlich der *Zielsetzung der Arbeit* wichtig sind:

Erstens: Erläuterung der geologischen Prozesse, die zur Entstehung der tertiären und quartären Schichtenfolge sowie den Eigenschaften und Verbreitungsgesetzmäßigkeiten des *kohleflözhangenden Deckgebirges* als dem „Kippensediment“ führen. Dabei wird die *Entwicklung und Änderung* geologischer Bedingungen entlang der in Querprofilen angetroffenen *quartären regionalgeologischen Zonen* mit jeweils charakteristischen Sedimenten und Mächtigkeiten herausgestellt werden.

Für das Quartär: Eisvorstöße und Reichweiten, Ablagerungsabfolge; für das Tertiär: Beziehungen zwischen Liefergebiet und Sedimentationsraum, da hier die Merkmale von Zusammensetzung und Gefüge in den Abraumschüttungskörpern angelegt sind. Es werden die *Grundzüge im Geologischen Bau* deutlich gemacht, das heißt die *Entwicklung und Änderung quer* zu den Zonen und die *Vergleichbarkeit* von Sedimentart und – Mächtigkeitsverhältnissen *entlang* dieser NW-SE verlaufenden Zonen. Dies ist Basis für die Auswahl zonenrepräsentativer Untersuchungstagebaue in einem erkundungsgeologisch angelegten N – S Schnitt.

Zweitens: Wichtig ist die Kenntnis der regionalen geologischen und gekoppelt hydrogeologischen Zusammenhänge – pleistozäne Rinnen - außerdem für die Einschätzung der Konsequenzen bei der künftigen *Anbindung der Kippenmassive* aufgrund ihrer inneren Strukturmerkmale an das gewachsene geologische und hydrogeologische *Schichtenprofil in der Region*.

2.1.1 Geologie des Niederlausitzer Braunkohlenreviers

Die heutige Geländeoberfläche der Niederlausitz zeigt starke Spuren der mit dem Braunkohlenbergbau großflächig vorgenommenen Deckgebirgsumlagerung und Massinentnahme *aus dem Geologischen Profil*. Dies wird deutlich im hohen Anteil „weiß“ dargestellter Tagebauflächen auf der Geologischen Übersichtskarte der Region, Abbildung 2-1.

Von der Umlagerung betroffen sind die *Tertiärschichten* mit den Braunkohlenflözen sowie die reliefbestimmenden *Quartärablagerungen*. Die wichtigsten Sand – Kies – Grundwasserleiter der Region sind hier bis 70 m unter Gelände aus ihrer natürlichen Lagerung in eine technisch erzeugte neue Anordnung gebracht worden. Neben der „Wirkung nach oben“ auf die Geländemorphologie haben geologische Vorgänge in der Quartärzeit in Bereichen wie dem Muskauer Faltenbogen die liegenden Tertiärsedimente überformt (glaziale Stauchung, Faltung, Bruch) sowie z.B. zur Erosion und Sedimentfüllung des Rinnensystems geführt. Unverritzte Sedimentfolge des Tertiär und Quartär, die neu entstandenen Kippenmassive sowie die Rinnen bestimmen Weg, Geschwindigkeit und Beschaffenheit des Grundwassers.

Die eiszeitlichen quartären Glazialablagerungen der Niederlausitz und die liegende tertiäre „Braunkohlenformation“ lagern in relativ geschlossener Verbreitung als lockersedimentäres *Deckgebirge* einem *Grundgebirge* aus präkambrischen bis kreidezeitlichen kristallinen und sedimentären Festgesteinen auf.

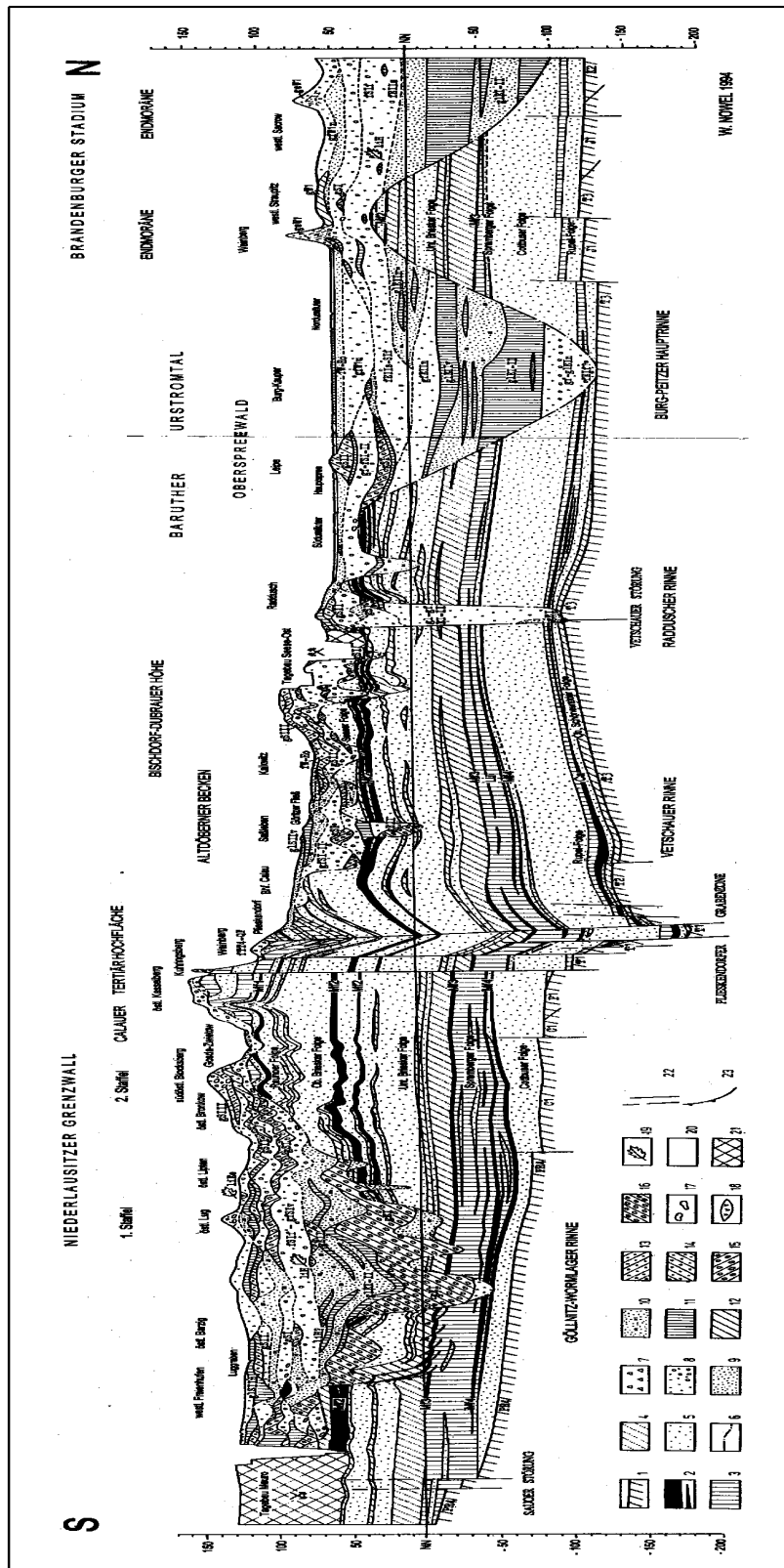
Während die Geländeoberfläche weitgehend von *den pleistozänen und holozänen* Ablagerungen des Quartärs eingenommen wird, ist das Auftreten von tertiären Sedimenten an der Geländeoberfläche auf *Tertiärhochflächen* beschränkt. Diese Flächen, z.B. Calauer Hochfläche und die Raunoer Hochfläche nördlich Senftenberg (Tagebau Meuro) durchragen plateauartig die umgebenden jüngeren quartären Ablagerungen und sind *Erosionsreste* des ursprünglich geschlossenen Verbreitungsgebietes der Raunoer Folge, das im Verlauf des Quartär durch Abtragung weitgehend zerstört worden ist.

Abbildung 2-1 (S. 22) Geologische Übersichtskarte Niederlausitzer Braunkohlenrevier, Nowel 1995.

1 - Jüngste (holozäne) Ablagerungen in Tälern und Flußauen, 2 – Binnendünen, 3 – weichselglaziale Hochflächen im Jungmoränengebiet nördlich des Baruther Urstromtals, 4 – jüngere saaleglaziale Hochflächen auf dem Niederlausitzer Grenzwall und in seinem nördlichen Hinterland, 5 – ältere saaleglaziale Hochflächengebiete und tertiäre Hochflächen, 6 – Endmoränen, 7 – nicht mit Endmoränen belegter, wahrscheinlicher Verlauf des ehemaligen Eisrandes, 8 – Wallberge (Oser), Kames) 9 – Sanderflächen, 10 – markante Grenzen (Unterschnidungen) zwischen unterschiedlich alten Sanderschüttungen, 11 – Ablagerungen und Terrassen in den Urstromtälern sowie Terrassen und Schwemmsandfächer der Flüsse, 12 – beckenartige Niederungsgebiete, 13 – Durchragungen prätertiärer Festgesteine, 14 – Braunkohlentagebaue (Stand 1990), 15 – Grube in Betrieb, 16 – Grube außer Betrieb, 17 – Außenkippen (Hochkippen), 18 – Gewässernetz, 19 – Spurlinien regionalgeologische Schnitte, Nowel 1995.

Abbildung 2-2 (S. 23) Regionalgeologischer Schnitt (S) - (N) Tagebau Meuro – Calau - Tagebau Seese-Ost. Deutlich werden Merkmale der Veränderung: Calau: Tertiär über 250 m mächtig, Quartär fehlt; Burg, Pleistozäne Rinnen: Quartär bis 180 m, Tertiär fehlt, Nowel 1995.





Legende

- 1 - Oberfläche der prätertiären Festgesteine, ungegliedert; 2 - Braunkohle; 3 - überwiegend tonige Sedimente der Rupel-, Spremberger und Raunoer Folge;
4 - überwiegend schluffige Sedimente der Briesker und Oberen Schönewalder Folge; 5 - überwiegend feinkörnige Sande; 6 - Grenze Tertiär/Quartär; 7 - präglaziale Kiessande des Senftenberger Elbelaufs;
8 - Mittel- und Grobsande, z.T. Kiessande (glazifluviatil und fluviatil); 9 - Feinsande (überwiegend glazilimnisch, z.T. fluviatil); 10 - glazilimnische Feinsande tonig-schluffig;
11 - glazilimnische Tone und Schluffe; 12 - Grundmoräne Weichsel I; 13 - Grundmoräne Saale III; 14 - Grundmoräne Saale II; 15 - Grundmoräne Saale I; 16 - Grundmoräne Elster I und Elster II;
17 - Steine (ausgewaschene Grundmoräne, Endmoräne, 18 - warmzeitliche Torfe und Mudden; 19 - Pollenanalyse; 20 - holozäne Niederungen (Torf, Mudde, Auelehm);
21 - Kippen des Braunkohlenbergbaus; 22 - endogen-tektonische Verwerfungen; 23 - glazigen-tektonische Aufschiebungen.

2.1.1.1 Das Prätertiär

Die Verbreitung prätertiärer Gesteine an der heutigen Erdoberfläche beschränkt sich auf *einzelne Aufragungen* – etwa der Nordsächsischen Grauwacke - im Süden der Niederlausitz. Granodiorit, Grauwackenhärtlinge ragen im Raum Zeißholz, dem südlichen Randgebiet des Niederlausitzer Braunkohlenreviers bis in das Flöz-Deckgebirge.

Zwei Merkmale des Grundgebirges bzw. der Geologie des Prätertiärs der Niederlausitz bestimmen wesentlich die *Mächtigkeitsverhältnisse und Zusammensetzung* der auflagernden Deckbirgsschichten aus tertiärem und quartärem Lockersediment und die *großräumige Grundwasser-Fließrichtung*:

- 1.) Die *Generalneigung* der prätertiären Landoberfläche *in nordöstlicher Richtung*. Das Tertiärprofil ist in diese Richtung zunehmend vollständiger und mächtiger entwickelt (Ausgleich der Geländeoberfläche), die Grundwasser-Fließrichtung in der tertiären Sedimentfolge verläuft in diese Richtung zur jeweiligen Erosionsbasis Urstromtal. Für das heute vorliegende Gesamtpaket aus tertiärem und quartärem Lockergestein wird demgegenüber das auf den Hochflächen gebildete Grundwasser hauptsächlich von parallel zu den Urstromtälern verlaufenden Hauptrinnen *in nordwestlicher Richtung* abgeführt. Die ihnen tributären Nebenrinnen sind SSW – NNE angeordnet.
- 2.) Aufgrund seiner herausgehobenen Position im Süden und Südwesten der Region wirkt dieser Bereich zur Zeit des Tertiärs als *Abtragungs- und Liefergebiet* für klastische Sedimentkomponenten von Schüttungen in den nördlich bzw. nordöstlich vorgelagerten Sedimentationsraum.

Die Nordostvergenz der prätertiären Landoberfläche ist in der Relativbewegung von Grundgebirgsschollen angelegt. Von der *Hochscholle* „Lausitzer Block“ im Südwesten, der zu den Aufragungen des *Varistischen Grundgebirges* gehört und aus präkambrischen und altpaläozoischen Gesteinen besteht, ist entlang des varistisch (NW-SE) streichenden „Lausitzer Hauptabbruchs“ die *Tiefscholle* „Lausitzer Triasscholle“ *abgeschoben*. Die „Lausitzer Triasscholle“ bildet den SE-Teil der Norddeutschen Senke, die Absenkung ist kimmerisch (während Alpidischer Ära im voralpidisch konsolidierten Bereich Mitteleuropas). Entlang der nach Nordosten einfallenden Abschiebungsfläche ist dabei die Tiefscholle aufgerichtet, bei der Relativbewegung geschleppt.

2.1.1.2 Das Tertiär

Das *Sedimentationsgeschehen* während der Tertiär-Zeit in der Niederlausitz wurde durch die Lage der Region am *Südrand der Nordwesteuropäischen Tertiärsenke* bestimmt, von Vinken 1988, Abb. 2-3. Auf generell leicht in Richtung Nordost abfallender prätertiärer Geländeoberfläche wurden 150 bis 200 m marin-brackische und terrestrische Lockersedimente, überwiegend *Feinsande*, Schluffe, Tone abgelagert und es entwickelten sich in Flachmoorsümpfen Braunkohle-Flöze.

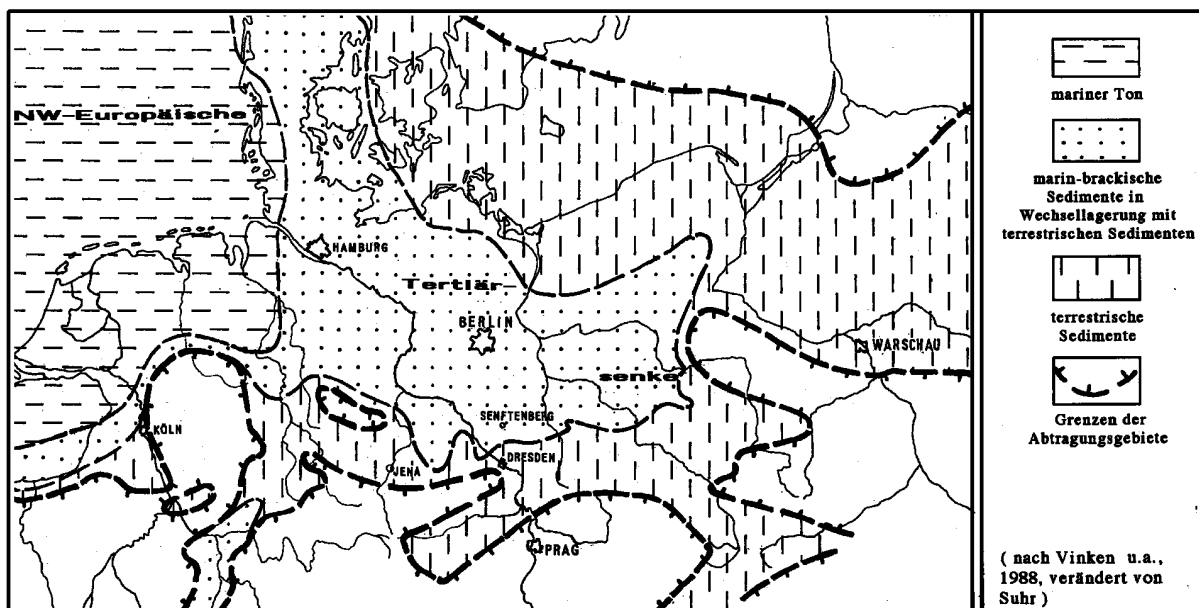


Abbildung 2-3 Die Nordwesteuropäische Tertiärsenke im Untermiozän, aus Suhr 1995.

Entsprechend der flachen Neigung des Ablagerungsraumes führen bereits geringfügige Spiegelschwankungen des aus dem zentralen Nordseeraum heranreichenden Meeres zu weiträumigen *Trans- und Regressionen*. Die häufigen Wechsel mariner und festländischer Sedimentation sind nicht allein auf globale Meeresspiegeländerungen zurückzuführen, sondern modifiziert durch lokale Schollenbewegungen, Halokinese und z.B. Subrosion mit der Folge kleinräumiger Mächtigkeitsänderungen, Brause et al. 1989. In einem breiten SW-NE verlaufenden Küstenraumbereich werden in charakteristischer Verzahnung *marine – brackische – festländische* Sedimente abgelagert. Neben grobsandigen Schüttungen aus einem nördlich – „Seeser Sande“ - und einem südlich gelegenen Liefergebiet - fluviatile „Spremlinger Folge“ - sind Schluffablagerungen mäandrierender Flußsysteme im Wattbereich, also Gezeitenrinnen oder Priele kennzeichnend, Suhr 1995.

Deutlicher Ausdruck der mehrfachen faziellen Wechsel sind schließlich die aus *festländischen* Torfmooren hervorgegangenen Braunkohlenflöze und die *flachmarinen* Wattablagerungen (Torfaufwuchsgeschwindigkeit < Absenkgeschwindigkeit) als Flöz-Begleitsedimente, die innerhalb der Flöze bzw. direkt im Liegenden und Hangenden auftreten.

Das generalisierte Profil der Abb. 2-5 zeigt den Wechsel *marin / festländisch* und wie im Laufe der Tertiärzeit im Raum Niederlausitz eine Verlagerung jeweils gleichzeitig existierender Sedimentations- und Nichtsedimentationsgebiete (Schichtlücken) *von Nordwesten nach Südosten* stattgefunden hat. Einer Ablagerung der eozänen Sernoer Schichten (Alttertiär) im Nordwesten der Niederlausitz steht zu dieser Zeit als Abtragungsgebiet das Zentrum, der Osten und der Südosten der Niederlausitz gegenüber. Dagegen ist zur Zeit des jüngeren Miozäns (Jungtertiär) v.a. die zentrale, östliche und südöstliche Niederlausitz *Sedimentationsraum* der Raunoer Folge bei *Abtragung* im Nordwesten und Westen. Erst im Pliozän erreichen tertiäre Ablagerungen den äußersten Südosten der Niederlausitz, die Bunten Tone von Weißwasser. Die Abb. 2-4 zeigt die unterschiedliche Reichweite der großenteils mit tektonischen Ereignissen zusammenfallenden *Meeresvorstöße (Transgressionen)* im Verlauf des Tertiärs und die flächenmäßig größte Verbreitung des 2. Lausitzer Flözes (2. LF), dem Gegenstand des Braunkohlenbergbaus in derzeit fünf Tagebauen.

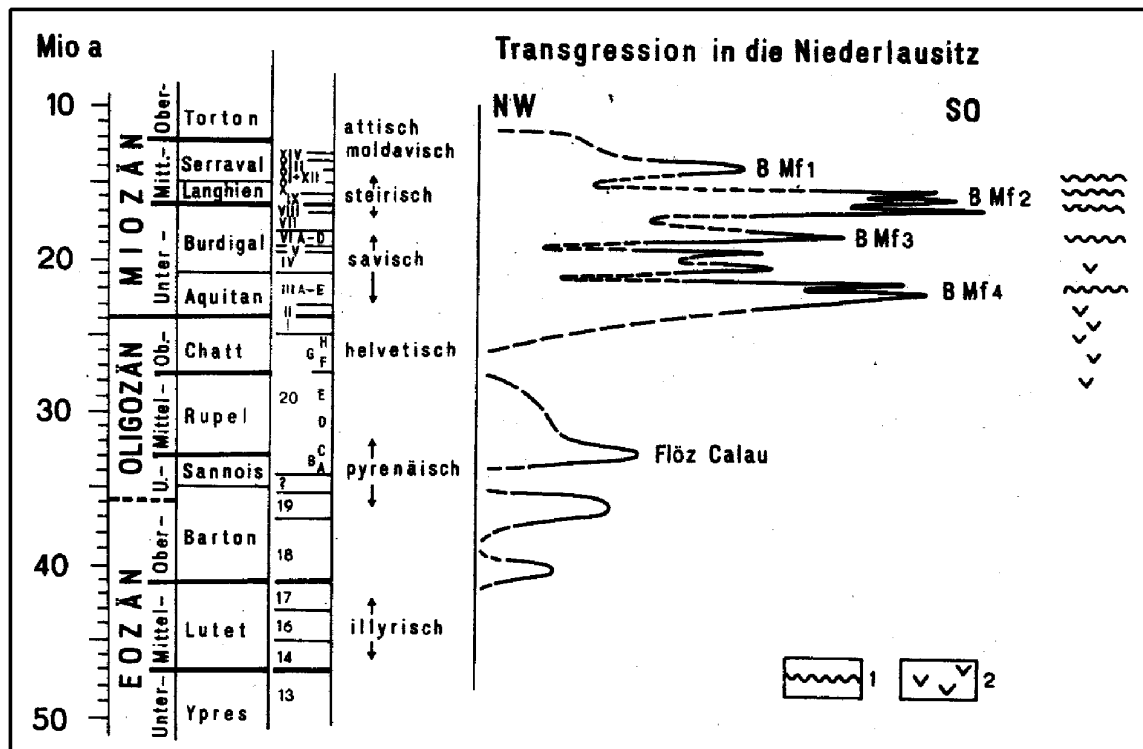


Abbildung 2-4 Unterschiedliche „Reichweite“ der Transgressionen während des Tertiärs in den Niederlausitzer Raum, 1-tektonische Impulse, Diskordanzen, 2-Basaltvulkanismus, Brause et al. 1989.

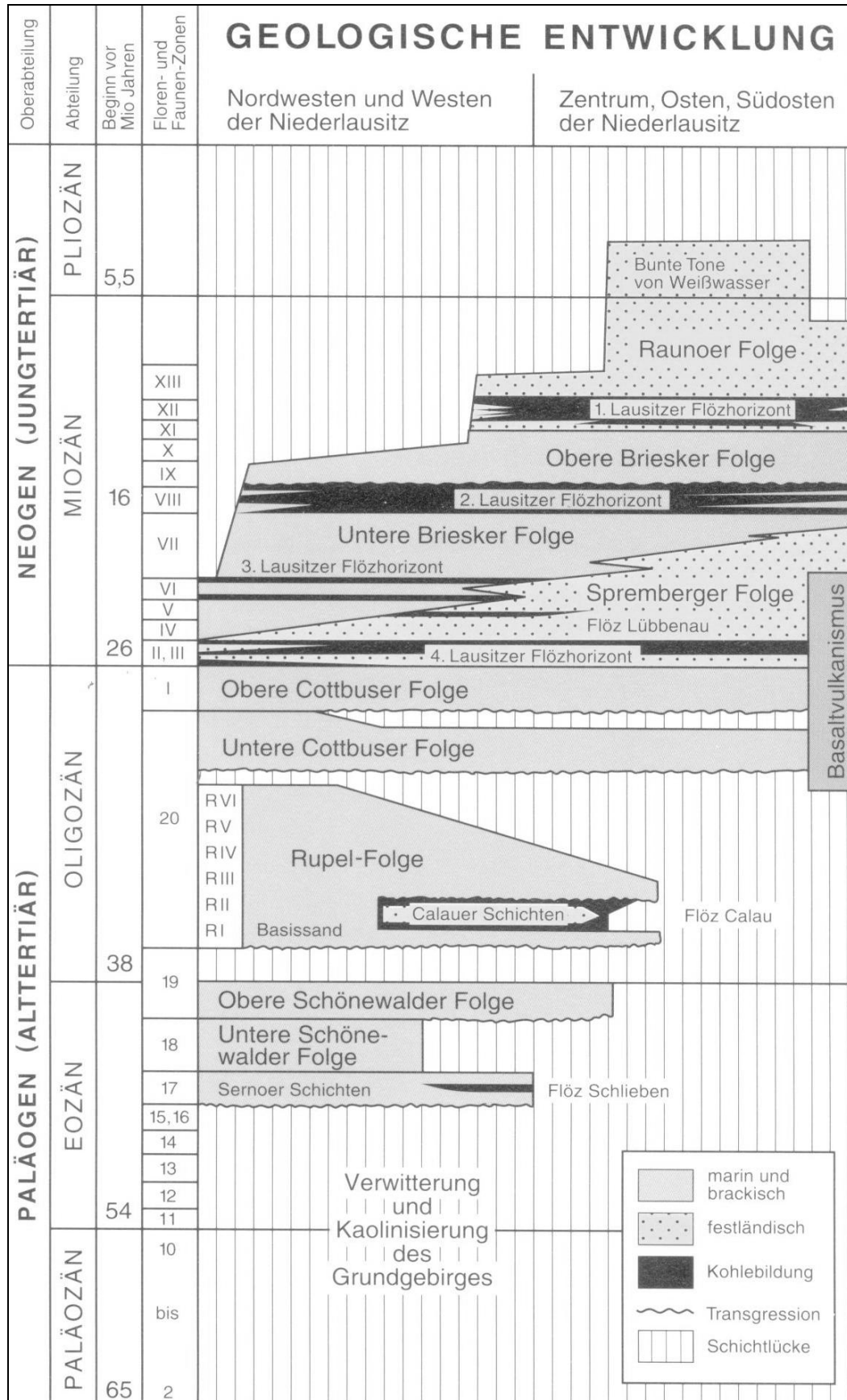


Abbildung 2-5 Generalisierte Geologische Schichtenfolge des Tertiärs in der Niederlausitz, aus Nowel et al. 1994. Entwicklung als Sedimentationsraum von Nordwesten nach Südosten.

Das 2. Lausitzer Flöz und seine Begleitsedimente

Das Deckgebirge dieses Flözes und die bei marinen Vorstößen (Moorzyklen unterbrochen) abgelagerten flachmarinen Ablagerungen, die im Falle $> 0,3$ m Mächtigkeit bei der Kohlegewinnung *ausgehalten* werden, gelangen in die Kippenschüttung.

Untere Briesker Folge – Liegendes des 2. LF

An deren Basis dokumentieren kohlige Schluffe und durch Huminsäuren braun gefärbte Feinsande (GWL 600) eine Transgression nach der terrestrischen Spremberger Folge. Die Feinschichtung in den Schluffen und kleinrhythmische Wechsel von Sand und Schluff sowie häufig Rinnen zeigen Wattablagerungen an, Suhr 1995. Darüber belegt der sogenannte *Unterbegleiter* wieder regressive Tendenzen. Häufig ist dieses Kohleflöz von unter 1 m Mächtigkeit durch ein schluffiges Äquivalent vertreten. Im Hangenden des Unterbegleiters (GWL 500) zeigen einige m, lokal bis 50 m Glimmerfeinsand marin-brackische Ablagerungsbedingungen an, Liegendschichten des 2 LF.

2. LF („Lausitzer Unterflöz“)

Das 2. LF belegt eine weltweite kurzzeitige Regressionsphase. Im Randbereich der Nordwesteuropäischen Tertiärsenke entstanden *10 bis 12 m Kohleflöz*. Im stärker *marin* beeinflussten Bereich des zentralen Senkengebiets (Kohlefelder Schlabendorf-Seese, Cottbus-Nord, Jänschwalde und Welzow-Süd) hinterließen die von Norden kommenden Meeresvorstöße im Flözbildungsraum marine Sand- und Schluffablagerungen (Sandwatt-Schlickwatt), die *Zwischenmittel*, die bis zum Auskeilen der Flöze führen. Schlufflagen innerhalb der Flöze werden als Gezeitenrinnen/Priel-Sedimente gedeutet. Im zur gleichen Zeit rein terrestrischen südlichen Raum, der von den Meeresvorstößen nicht erreicht wurde, tritt ein geschlossener Flözkörper auf, *Tagebau Meuro* sowie die Tagebaue Greifenhain, Scheibe, Nochten und Reichwalde.

Das Kohleflöz wird durch die *Abfolge mehrerer Moorsukzessionen* aufgebaut. Innerhalb einer vollständig ausgebildeten Moorsukzession sind die nacheinander entwickelten Moortypen als heute vorliegende Kohletypen bzw. –fazies – Faziesanalyse - dokumentiert. Von Bedeutung ist das „kohlenchemische und geochemische Profil“ eines Kohleflözes durch den gewinnungstechnisch bedingten *Eintrag von Kohle in die Kippenmassive*. So sind Teile des überdurchschnittlich schwefelführenden Flöztops ein Eintragsweg von Eisensulfid in die Kippen. Dazu kommen die sulfidhaltigen Liegendschluffe an der Kippenbasis.

Obere Briesker Folge – Hangendes des 2. LF

Direkt über dem Flöz bildet feingebänderter kohligter Schluff den „*Hangendschluff*“, besonders mächtig bei Flözen ohne Zwischenmittel im Zentralrevier, wie im Tagebau Meuro. Glaukonit und sandschalige Foraminieren belegen ein energiearmes lagunenartiges Milieu einer neuerlichen Transgression. Mit dem stark glimmerhaltigen Schluff bzw. Schluffton verzahnt oder unmittelbar im Flözhangenden abgelagert sind in den „Nördlichen Randfeldern“ des Niederlausitzer Braunkohlenreviers die „*Seeser Sande*“. Schluffarme schräggeschichtete - Schüttung aus nördlicher Richtung - Mittel- und Grobsande, basal auch Kies belegen eine hochenergetische litorale bis flachmarine Randbildung. Charakteristisch ist die nordische Geröllgemeinschaft, für die mariner Eisschollentransport die plausibelste Erklärung bietet, Ahrens & Lotsch 1976. Die im Hangenden abgelagerten zunehmend schluffhaltigen Sedimente des *Oberbegleiters* (hangend GWL 300, liegend GWL 400) belegen eine kurze regressive Phase mit Kohlebildung im Süden. Randmarine Sande schließen die Obere Briesker Folge ab.

Raunoer Folge

In einer erneuten regressiven Phase – Hebung des Festlands im Süden - entwickelte sich die *Raunoer Folge*, verzahnt mit dem *1. Lausitzer Flöz* („Lausitzer Oberflöz“). Die festländischen Sedimentkomponenten der Raunoer Folge gelangten aus dem epirogenetisch gehobenen Oberlausitzer Bergland in den Niederlausitzer Ablagerungsraum. Nach *Erosion im Pleistozän* existiert diese aus hellen Quarzsanden und Kiesen (GWL 200) und Tonsedimenten (Flaschenton) bestehende Sedimentfolge nur reliktiert in Hochflächen wie der *Raunoer Tertiärhochfläche*, darin Tagebau Meuro.

2.1.1.3 Das Quartär

Die Niederlausitz liegt im *Mitteleuropäischen Tiefland*. Sie hat wie dieser gesamte Raum zwischen Nord- und Ostseeküste im Norden und dem zentraleuropäischen Mittelgebirge im Süden ihre morphologische und mächtigkeitswirksame Prägung wesentlich im Zuge der kaltzeitlichen quartären Inlandeisvorstöße aus Skandinavien und warmzeitlichen Schmelzwasserbildungen erhalten.

Abweichend von der verbreiteten Vorstellung eines reliefarmen Gebiets bestimmen die morphologischen Elemente und Ablagerungen der *Glazialen Serie* das Landschaftsbild und den geologischen Aufbau des oberflächennahen Untergrundes. Abb. 2-6 zeigt, wie die unterschiedlich weit nach Süden reichenden Eisvorstöße eine in etwa parallel verlaufende Folge von Systemen von *Eisrandlagen* (*Endmoränen*) und zugehörigen entwässernden *Urstromtälern* sowie den *Grundmoränen*, welche glaziale Hochflächen bilden, geschaffen haben.

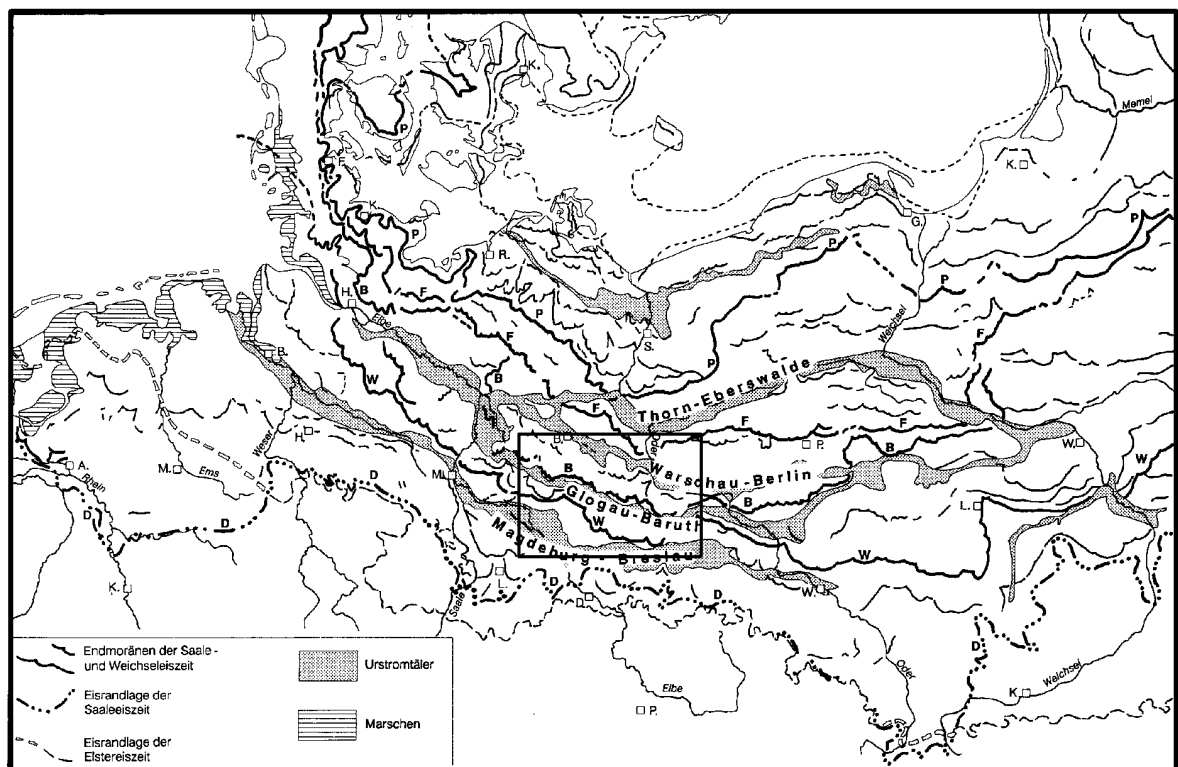


Abbildung 2-6 Haupteisrandlagen (Stadiale) und Urstromtäler der nordeuropäischen Vereisungen im Mitteleuropäischen Tiefland, Liedke 1981; Stadiale P, F, B, W, D siehe Tabelle 2-1.

Von den eingetragenen Endmoränen des Mitteleuropäischen Tieflands gehören, von Norden kommend bis zur Eisrandlage des Brandenburger Stadiums (B) das Gebiet zur morphologisch abwechslungsreicheren *Jungmoränenlandschaft*, die südlich gelegenen zur

stärker eingeebneten *Altmoränenlandschaft*. Ablagerungen des Elster-Glazials sind auf den Basisbereich von Erosionsrinnen beschränkt und treten in der Niederlausitz nicht an der Geländeoberfläche auf.

		Glazial	Stadial	
N	Jungmoränen	Weichsel	P	Pommersches Stadium Urstromtal von Thorn-Eberswalde
			F	Frankfurter Stadium Warschau-Berliner Urstromtal heutige Weichsel – Berlin – Spree – Elbe
			B	Brandenburger Stadium Glogau- <i>Baruther Urstromtal</i> verfolgbar bis zur Untereibe
S	Altmoränen	Saale	W	Warthe Stadium, hier Lausitzer Grenzwall Breslau-Magdeburg-Bremen, hier <i>Lausitzer Urstromtal</i> Oder – Oberlausitz - Elbe – Magdeburg – Ohre- und Allertal – Untere Weser bis Bremen
			D	Drenthe Stadium

Tabelle 2-1 Haupteisrandlagen (Stadiale) und Urstromtäler der nordeuropäischen Vereisungen im Mitteleuropäischen Tiefland.

Der eingetragene Ausschnitt *Niederlausitzer Braunkohlenrevier* macht mit der Lage der reliefbestimmenden Höhenrücken der Endmoränenzüge deutlich, wie die Region als Beispiel für das gesamte *Formenspektrum der glazialen Serie* mit den zugehörigen *Sedimenten* in typischer zonarer Anordnung steht.

Wiederzufinden ist dieser Bau in der Geologischen Karte des Niederlausitzer Braunkohlenreviers - definiert als das Verbreitungsgebiet des 2. LF und 1. LF („Oberflöz“ des älteren Bergbaus), welche die weitgehende Bedeckung des tertiären und prätertiären Untergrunds mit quartären Ablagerungen sowie die Zonierung in NW-SE verlaufende quartärgeologische Einheiten zeigt. Die ältesten Inlandeisvorstöße, welche das Gebiet des Niederlausitzer Braunkohlenreviers überfahren haben, sind die des Elster-Glazials. Sie markieren den Beginn der Quartär-Ablagerungen und sind nach einer frühquartären Schichtlücke infolge Heraushebung und Abtragung am weitesten nach Süden vorgedrungen und ebenen durch Auffüllung der tiefreichenden Erosionsformen (Rinnen) das Relief ein. Insgesamt 6 Inlandeisvorstöße (Stadiale) erreichten innerhalb der *Glazialzeiten* das Gebiet des Niederlausitzer Braunkohlenreviers, Nowel et al. 1995. Schematisierend und ohne die nur reliktiert verbreiteten Ablagerungen der Interglazialzeiten läßt sich eine dachziegelartige Anordnung der Glazialzeit-Ablagerungen skizzieren.

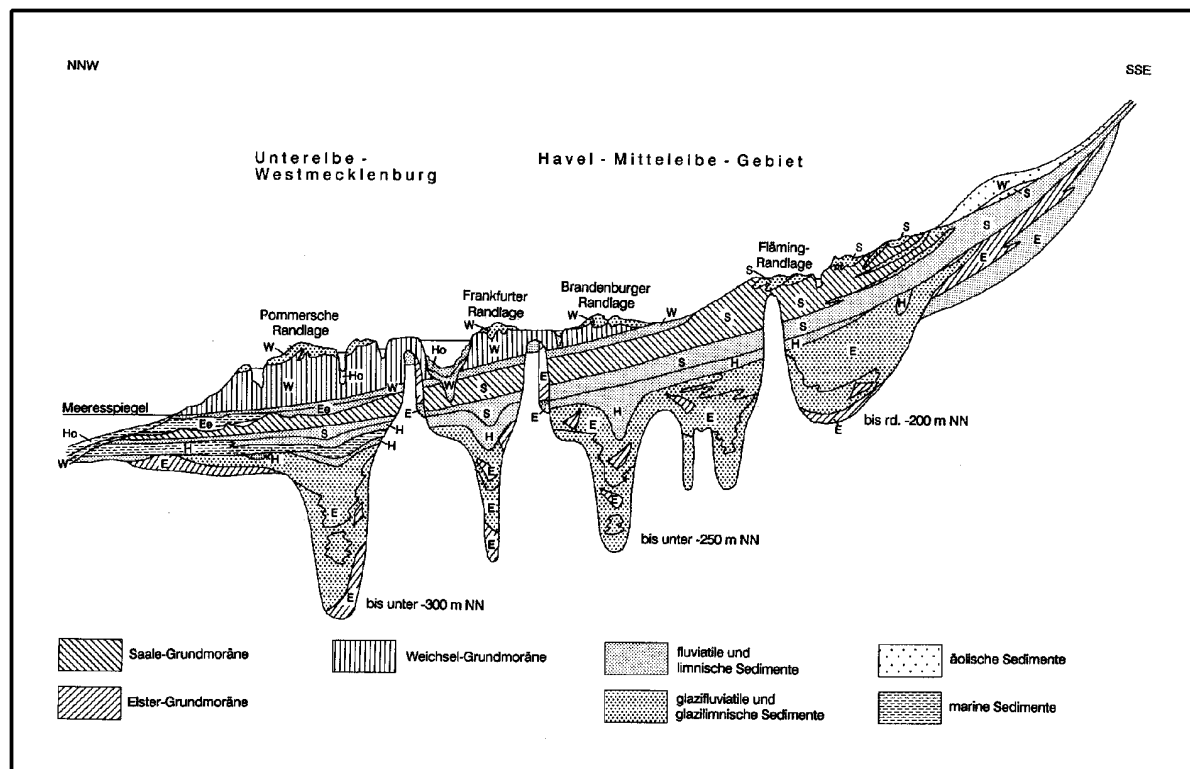


Abbildung 2-7 Dachziegelartige Anordnung der Ablagerungen der Glazialzeiten in der Niederlausitz in einem Nord-Süd – Profil; der älteste Eisvorstoß erreichte maximale Ausdehnung nach Süden, nach Eissmann & Müller 1979 in Walter 1995.

Die *Mächtigkeit* der im Durchschnitt 50 bis 100 m eiszeitlichen Sedimentfolge nimmt von Süden nach Norden zu, Wagenbreth & Steiner 1990. Für einen Mächtigkeitsvergleich in einem N-S Profil und Interpretation als altersbedingter Verwitterungs- und Abtragungsfortschritt müssen *äquivalente Körper der glazialen Serie* – Endmoräne, Grundmoräne, Sander, Urstromtal – herangezogen werden. Außerdem sind Mächtigkeitsextrema zu beachten, wie auf *tertiären Hochflächen* mit unter 10 m beziehungsweise mit über 150 m in den *Rinnensystemen*, v.a. am Rand des Kohlenreviers, etwa in Lübben und Burg/Spreewald. In solchen Rinnen liegen Quartär-Sedimente teilweise direkt auf dem prätertiären Untergrund. Ihre Anlage geht wahrscheinlich auf die frühpleistozäne Flußerosionsleistung in epirogenetisch gehobenen tertiären Rumpfflächen zurück und hatte die Zerlegung ursprünglich geschlossener Bereiche in einzelne *Kohlefelder* zur Folge, Nowel et al. 1995. Zum sedimentären Inventar des Quartär zählen außerdem die frühpleistozänen *präglazialen Flußschotter*, die aufgrund der sächsisch-böhmischen Geröllgemeinschaft, umgelagertes Tertiär, als Sedimente ehemaliger Elbeläufe gelten und reliktiert auf nicht eiserodierten Tertiärhochflächen vorkommen, Genieser 1955.

Der Raum des Niederlausitzer Braunkohlenreviers, entsprechend dem Verbreitungsgebiet des 1. und 2. LF ist durch die Linien im

Westen Elsterwerda – Finsterwalde – Luckau

Osten Lausitzer Neiße

Süden Lauchhammer – Hoyerswerda (Zeißholz) – Niesky

Norden Lübbenau (im Spreewald) – Cottbus – Peitz – Guben

abgrenzbar und durch die Abfolge dreier „Sätze“ (2 komplett und 1 zum Teil) der morphologischen Elemente und Ablagerungen der Glazialen Serie gekennzeichnet.

Entsprechend dem abnehmenden geologischen Alter der glazialen Ablagerungseinheiten vom Liegenden zum Hangenden folgen von Süden (Drenthe-Stadium) nach Norden (Brandenburger Stadium) entlang der auf Abb. 2-1 eingetragenen Profillinie an der Geländeoberfläche anstehende Ablagerungen immer jüngerer Vorstöße, welche die Niederlausitz erreichten, im Falle der Weichsel-Ablagerungen nur am Rande, Tabelle 2-2.

	Geomorphologie		glazialmorphologisches Element	Verbreitung	Lage Tagebaue/ Kippen
Brandenburger Stadium	weichselglaziale Hochfläche		Grundmoräne		
	Eisrandlage des weichselglazialen <i>Brandenburger Vorstosses</i>	W1	Endmoräne	Guben, Byhleguhre, Lübben	
			Sander(fläche)	Taubendorfer Sander südlich Guben	
			Sedimente und Terrassen des <i>Baruther Urstromtals</i> mit den Niederungen des Spreewalds darauf holozäne Sedimente in Flußauen		Seese-Ost, Seese-West, Schlabendorf-Süd, Schlabendorf-Nord, Cottbus-Nord, Lüssow-Nord
Warthe-Stadium	jüngere saaleglaziale Hochfläche im nördlichen Hinterland des Niederlausitzer Grenzwalls		Grundmoräne		
	beckenartige Niederungsgebiete in den Hochflächen				
	ältere saalezeitliche Hochfläche		SI-Grundmoräne		
	jüngere saaleglaziale Hochfläche auf dem Niederlausitzer Grenzwall		Grundmoräne		
	Eisrandlage des saaleglazialen <i>Warthe Vorstosses</i> Niederlausitzer Grenzwall	SII	Endmoräne	von Bad Muskau (Faltenbogen) im SE bis Luckau im NW durch das Zentrum des Braunkohlerevi- ers	Greifenhain, Gräbendorf, Welzow-Süd
			Sander(fläche)		
	beckenartige Niederungsgebiete				
	ältere saaleglaziale und tertiäre Hochfläche		SI-Grundmoräne		
			Sedimente und Terrassen des <i>Lausitzer Urstromtals</i> darauf holozäne Sedimente in Flußauen		Meuro
	ältere saaleglaziale Hochfläche		Grundmoräne		
Drenthe-Stadium	Eisrandlage des saaleglazialen <i>Drenthe Vorstosses</i>	SI	Endmoräne	Tröbitz – Plessa – Lauchhammer – Hohenbocka – Zeißholz – Rietschen	

Tabelle 2-2 Entwicklung Quartär vom Liegenden zum Hangenden – von Süden nach Norden; erstellt aus „Geologische Übersichtskarte des Niederlausitzer Braunkohlenreviers, 1:200.000, Nowel 1995.

Der älteste und am weitesten nach Süden erfolgte saalezeitliche Eisvorstoß (SI) ist über das Gebiet des Niederlausitzer Braunkohlenreviers hinaus bis in die sächsische Oberlausitz gelangt – Gröden, Ortrand und ebenso wie die noch älteren Elster-Glazial-Ablagerungen nicht an der Erdoberfläche vertreten und nur in Bohrungen nachweisbar.

Entsprechend Materialverfügbarkeit und den wirksamen Transport- und Ablagerungsprozessen folgt in den Einheiten der *Glazialen Serie* die Sedimentation mit jeweils charakteristischer petrographischer Zusammensetzung, welche die Nutzung vorgibt.

N	Einheit der Glazialen Serie	Sediment – Prozeß – Vorkommen	Nutzung
	Nachschüttbildungen	(8) Rückzugsbändertone, schluffig (glazilimnisch) (7) glazifluviatile Rückschmelzsotter	
	(6) Grundmoräne	Geschiebemergel und Geschiebelehm (oberflächennah)	Landwirtschaft
	(3) Endmoräne	Geschiebemergel und Geschiebelehm (oberflächennah) – ausgewaschen: Sand, Kiese, Steine, Nordische Geschiebe	Laubwald
	Vorschüttbildungen	(2) Vorstoßbändertone, schluffig (glazilimnisch), (1) anaglaziale Flußschotter und glazifluviale Vorstoßschotter	
	(4) Sander	durch Schmelzwasser aus Moränen gespülte geschichtete Sande und Kiese (glazifluviale Schmelzwassersande)	Kiefernwald
S	(5) Urstromtal	aus Geschiebemergel ausgewaschene Fein- bis Grobsande (Talsande)	Wiesen und Weiden

(9) kataglaziale Flußschotter und Interglazialablagerungen, (10)-(12) ältere gestauchte Schichten

Tabelle 2-3 Ablagerungseinheit – Sediment-Prozeß-Vorkommen – Nutzung der Glazialen Serie.

Jeder Inlandeisvorstoß wird von glazifluviatilen und glazilimnischen Ablagerungen aus der Vorstoßphase, den *Vorschüttbildungen*, und der Rückschmelzphase, den *Nachschüttbildungen*, begleitet, Cepek 1995. Diese sind in Abbildung 2-8 in der Lage relativ zum Endmoränenwall eingetragen. Abhängig von Oszillationen des Inlandeises können Wechsellagerungen von Vorschütt-, Geschiebemergel- und Nachschüttablagerungen entstehen.

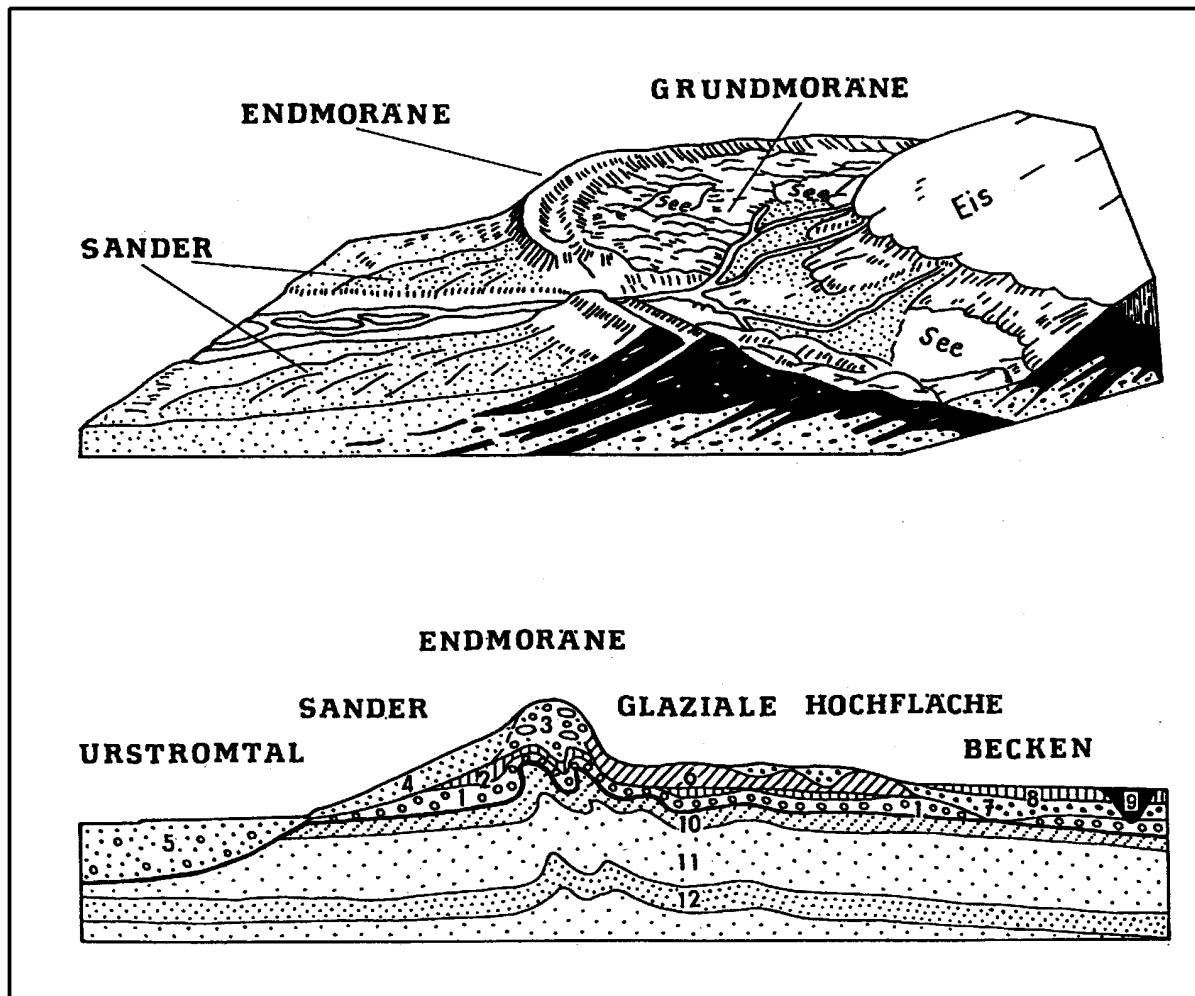


Abbildung 2-8 Die Glaziale Serie – Lage und Angaben zur petrographischen Zusammensetzung der Ablagerungseinheiten, aus Nowel 1995, Legende (1)-(12) in Tabelle 2-3.

2.1.1.4 Quartärgeologische Zonen des Niederlausitzer Braunkohlenreviers – Untersuchungstagebaue

Die Regionale Geologie der Niederlausitz zeigt die größten Veränderungen in NE-SW-Richtung. Innerhalb NW-SE-verlaufender Zonen hat eine *vergleichbare geologische Entwicklung* mit entsprechendem Bau (Deckgebirgsmächtigkeit) und Zusammensetzung der Ablagerungen stattgefunden. Diese *regionalgeologischen Zonen* sind durch die tertiären *Flözbildungsräume* und die quartären Überlagerungen mit den pleistozänen Abschmelzungsstrukturen, den *Urstromtälern* und glazifluviatiles Rinnensystem gekennzeichnet.

Definiert werden 3 Zonen, die sich in einer Kombination von Merkmalen (Petrographie, Mächtigkeit) der tertiären und quartären Schichten unterscheiden, G. Voigt (LSAB) 1997.

Zone I - *Nordrand* der Braunkohlen-Lagerstättenteilfelder (Flözbildungsbereich des 2. Lausitzer Flözes), gleichzeitig *Baruther Urstromtal* mit pleistozänen Auswaschungsrinnen.
Tagebaue/AFB-Innenkippen: Schlabendorf-Nord, Schlabendorf-Süd, Seese-West, Seese-Ost, Cottbus-Nord, Jänschwalde.

Zone II - „*Lausitzer Grenzwall*“, entspricht Endmoränenlage (maximale Ausdehnung der Saale II-Vereisung) im Pleistozän.
Tagebaue/AFB-Innenkippen: Gräbendorf, Greifenhain, Welzow-Süd.

Zone III - *Südrand* der Braunkohlen-Lagerstättenteilfelder, gleichzeitig *Breslau-Magdeburger-Urstromtal* („*Lausitzer Urstromtal*“) mit pleistozänen Auswaschungsrinnen.
Tagebaue/AFB-Innenkippen: Kleinleipisch, Klettwitz, Meuro, Sedlitz, Skado, Bluno, Spreetal, etc.

Stellvertretend für die übrigen Tagebaue/Innenkippen der regionalgeologischen Zonen wurden die AFB-Innenkippen der „Urstromtal-Tagebaue“ Seese-Ost (Zone I, Baruther Urstromtal) und Meuro (Zone II, Lausitzer Urstromtal) für das kippengeologische Erkundungs- und Untersuchungsprogramm ausgewählt.

Abbildung 2-9 zeigt mit den unterschiedlich weit nach Süden reichenden Zwischenmitteln (marine Vorstöße) ein Kennzeichen der räumlich verschieden entwickelten Schichtenfolge des Tertiär.

Die Lage beider Tagebaue ist durch die *Hauptabstromrichtung des Grundwassers* in den quartären Urstromtal-Sedimenten – indirekt - nach NW gekennzeichnet. *Quer* zu diesen Richtungen verlaufende pleistozäne Ausräumungszonen, häufig an die Kohlefelder angrenzend, münden in die Urstromtäler.

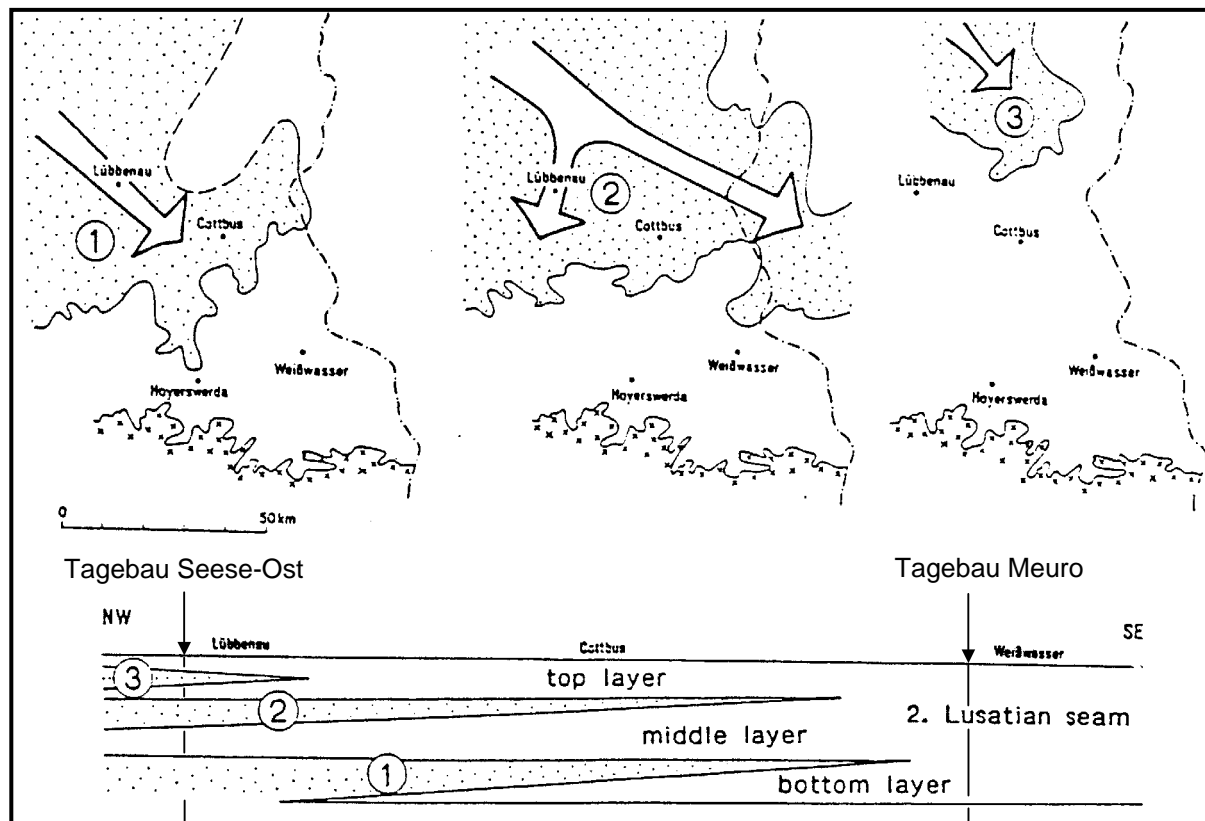


Abbildung 2-9 Die unterschiedlich weit nach Süden reichende Entwicklung von Zwischenmitteln (ZM) im 2. Lausitzer Flöz. Ausbildung 3er ZM im nördlich gelegenen Tagebau Seese-Ost, keine ZM im Tagebau Meuro, ergänzt nach Suhr et al. 1992. Haupttransgressionsrichtung während der Flözbildungszeit ist von NW nach SE, vgl. Brause et al. 1989.

2.2 Technogener Faktor – Abgrabung und Verkippung des Deckgebirges mit Abraumförderbrücken (AFB) zur Freilegung des Braunkohlenflözes

Lagerstättengeologische Voraussetzungen, die den Einsatz der effektiven Förderbrückentechnologie für die Abraumabgrabung und -umlagerung ermöglichen, sind das Verhältnis Abraum- zu Flözmächtigkeit, die großflächige Verbreitung der annähernd horizontal gelagerten Braunkohlenflözkörper sowie die lockere Beschaffenheit des Deckgebirges. Diese sind mit dem *epirogenetischen Lagerstättentyp* im Niederlausitzer Braunkohlerevier gegeben.

2.2.1 Entwicklung der AFB-Innenkippen – Hauptrichtungen im Förderbrückentagebau

Abhängig von der Deckgebirgsmächtigkeit des zu gewinnenden 2. Lausitzer Flözes, der Abtragsmächtigkeit werden zur Flözfreilage und Abraumumlagerung *Förderbrücken* mit entsprechender Abtragsleistung in Vertikal-m eingesetzt. Abbildung 2-10 zeigt einen Förderbrückentagebau mit einer auf einem Gleisrost fahrenden F34-AFB zum Einsatz für Flöz-Deckgebirge bis 34 m.



Abbildung 2-10 Abraumförderbrückenbetrieb, Braunkohlentagebau „Seese-Ost“, Abbaurichtung (←), Blick in Strossenrichtung (←→), Schroeder & Nowel 1995.

Die drei Hauptbereiche bei der *Deckgebirgsumlagerung mit Abraumförderbrücken* sind:

Abbauseite Baggerböschung	Offener Tagebauräum	Kippenseite Kippenböschung
<i>Abraumabbaggerung</i> , meist in Hoch- und Tiefschnitt mit Eimerkettenbaggern	<i>Abraumförderung</i> mit der Abraumförderbrücke, Freilegung Braunkohlenflöz Kohleförderung	<i>Abraumverkippung</i> in die <i>Vorkippe</i> , dem Arbeitsplanum der kippenseitigen Förderbrückenstütze und die <i>Hauptkippe</i>

Der *kontinuierliche* Transport der zu bewältigenden Abraummassen auf *kürzestmöglichem, direkten* Weg über den offenen Tagebauraum hinweg zur Schüttung eines Kippenkörpers machen die AFB-Technologie zur effektivsten in der industriellen Braunkohlegewinnung.

Dagegen fällt bei der Braunkohlenförderung im *Rheinischen Revier* der vergleichsweise hohe Energieaufwand für die strossenparallele Abraumförderung ins Gewicht. Bei dem dort bestehenden *tektonischen Lagerstättentyp* kann die Kohle jeweils nur aus *schmalen Flözbereichen* gefördert werden.

Beim AFB-Betrieb ist die jeweils freigelegte Flözfläche durch die *Brückenspannweite* und die zur geotechnischen Sicherheit auf Bagger- und Kippenseite erforderlichen Böschungsbreite limitiert.

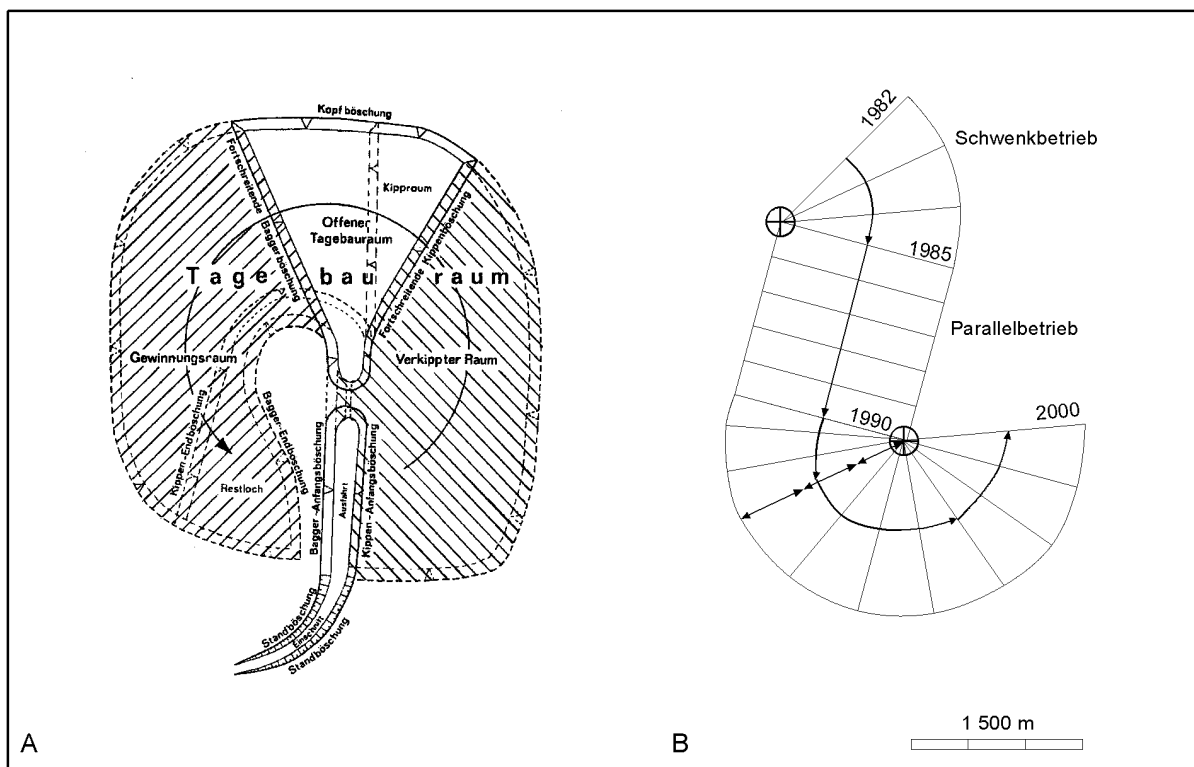


Abbildung 2-11 A, B Bei der Entstehung der AFB-Innenkippen wirksame Abbaurichtung (→), Strossenrichtung (←→), Grundrisse nach Gruschka 1992, ∇∇∇ Baggerböschungen, YYY Kippenböschungen.

Zwei schematisierte Grundrisse von Förderbrückentagebauen zeigt die Abbildung 2-11. Die *Entwicklung* der Tagebaue und Kippenmassive zeigt außer dem Parallelbetrieb den *Schwenkbetrieb* mit einem kreisbogenförmigen Verlauf der Abbaurichtung um einen bzw. mehrere Drehpunkte D.P., ⊕, meist angelegt in flözfreiem Gebiet, z.B. dem Aufschlußraum.

Dieses Aufschwenken bietet die *Vorteile* einer

- besser möglichen *Anpassung an die Kohlefeldgrenze* zur maximalen Auskohlung der durch Auskeilen (Flöz-Mindestmächtigkeit von 1 m) oder pleistozäne Auswaschungszonen begrenzten Felder,
- *zentralen Wasserhaltung*, mit Zufluß von Niederschlagswasser in den Liegendentwässerungsgräben zum Tagebautiefsten im D.P.-Bereich.

Strukturvorgabe für den Aufbau des AFB-Kippenmassivs sind die *Abbaurichtung* (→) und quer dazu die *Strossenrichtung* (←→).

2.2.2 AFB-Innenkippen – Außenkippen aus Aufschlußabraum

Der *Aufschlußabraum* aus der Herstellung der Aufschlußfigur (Bodendecke und oberstes Deckgebirge) wird, wenn nicht in Rand- bzw. Restschläuche benachbarter ausgekohlter Tagebaue verkippt, als *Außenkippe* (*Außenhalde*), *AK* auf der Geländeoberfläche außerhalb des Tagebauraums abgelagert, Beispiel „Bärenbrücker Höhe“, *AK* Tröbitz, *AK* Domsdorf.

AFB-Innenkippen mit Kippenoberflächen, die in etwa dem vorbergbaulichen Gelände-Niveau entsprechen (Abraum *im* Tagebauraum) gelangen beim Grundwasserwiederaufstieg und den für die Niederlausitzer Urstromtal-Tagebaue typischen *flurnahen Grundwasser-Ständen* weitgehend *in den Grundwassereinflußbereich*. Außenkippen unterliegen dagegen ausschließlich dem Einfluß versickernder *Niederschläge*.

2.2.3 Das „Aufwachsen“ der Abraumschüttung – Kippenstrukturmerkmale

Die Entwicklung des Kippenkörpers erfolgt durch kontinuierliche Fahrt des AFB-Verbandes in *Strossenrichtung* (\longleftrightarrow), wobei das bis zu einer bestimmten Spantiefe in *Abbaurichtung* (\rightarrow) gewonnene Deckgebirge fortlaufend auf der Kippenseite geschüttet und dort zu längsgestreckten Haufwerken, *Schüttungsrippen* „aufwächst“. Der Innenbau der Schüttungsrippen ist durch die nach oben aufgewachsene Folge von *Schüttungsschichten* gekennzeichnet.

Nach Erreichen der maximalen Auslage der abraumgewinnenden Eimerkettenbagger im Hoch- und Tiefschnitt wird durch das Rücken der Gleise im zurückliegenden Strossenabschnitt der Förderbrückenverband um die ca. 10 m betragende *Rückbreite* in Abbaurichtung versetzt. Durch das Weiterrücken wird in der neu erreichten Stellung die nächste *Schüttungsrippe* erzeugt, Abbildung 2-12.

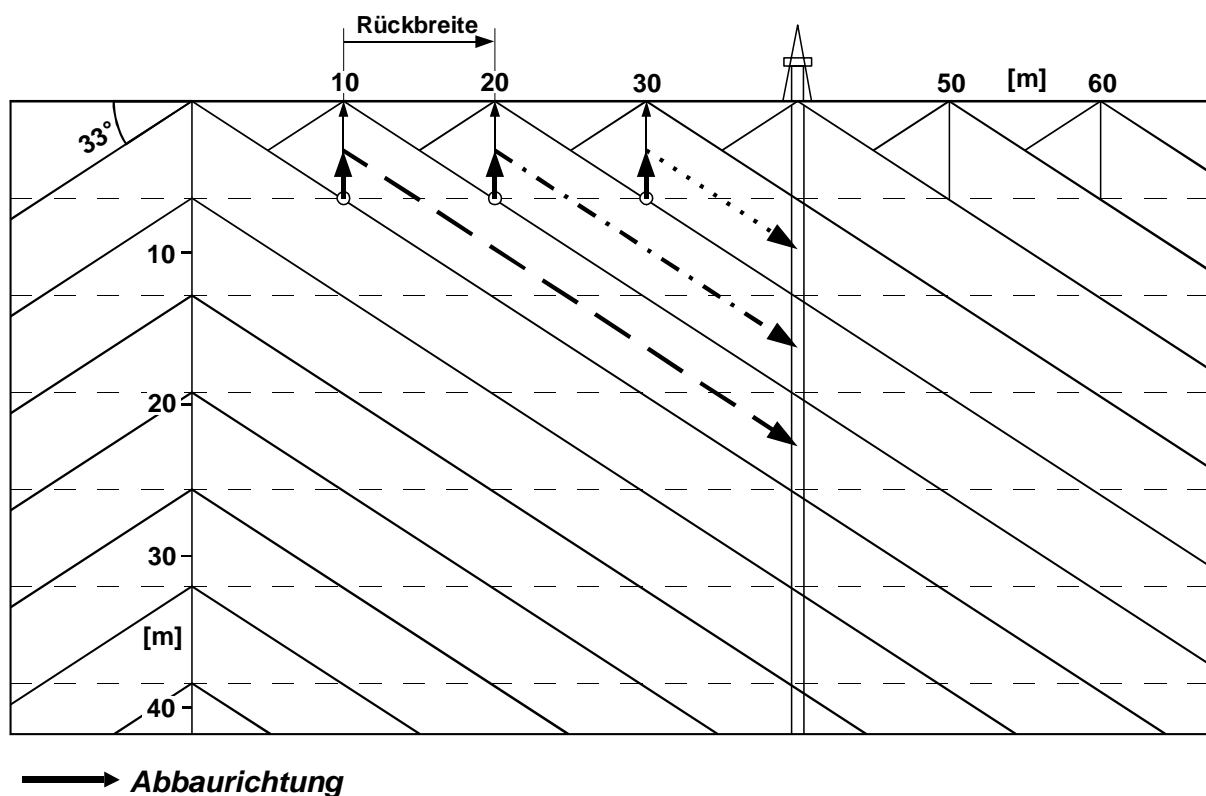


Abbildung 2-12 Innerhalb eines Rückintervalls „wachsen“ die kontinuierlich in „Schüttungsschichten“ geschütteten Abraummassen zu einer „Schüttungsrippe“ auf. Die Aneinanderreihung der Schüttungsrippen ist Strukturmerkmal der AFB-Kippen. Schnitt quer zur Strossenrichtung, winkeltreue Darstellung ($M_{\text{vertikal}}=M_{\text{horizontal}}$), Vergenz in Abbaurichtung.

Die scheinbare *Mächtigkeit* h der *Schüttungsrippen*, die in einer vertikalen Kippenbohrung anzutreffen sind, resultiert aus den Größen α und b .

- *Schüttböschungswinkel* α (Gleichgewicht zwischen Böschungswinkel und Winkel der inneren Reibung des Schüttguts). Abhängig v.a. von Feinkornanteil und Kornform. Da die Schmierwirkung von Trennfilmen beim überwiegend sandigen Schüttgut keine Rolle spielt, ist der Reibungswinkel unabhängig davon, ob die Poren mit Luft oder mit Wasser gefüllt sind, Bernatzik 1947. Thiemig (mdl. Mittlg.) 1999 gibt für Seese-Ost 33-34° an, nach Schubert 1972 ostelbisch zwischen 30 und 35°.
- *Rückbreite* b , im Parallelbetrieb strossenweit 10 m, im Schwenkbetrieb zwischen 6 m (D.P.) und maximal 13 m (Schwenkende).
- Mit $h = \tan \alpha \cdot b$ ergibt sich für einen Böschungswinkel von 33° und 10 m Rückbreite eine *scheinbare Mächtigkeit* h der Schüttungslamelle von 6,5 m.

Den Rückintervallen der Arbeitsebenen folgen die auf der Liegendfläche im Liegendschluff angelegten *Liegendentwässerungsgräben*. Die strossenparallelen, in Richtung Wasserhaltung führenden Gräben dienen der Flächenentwässerung nach Niederschlägen. Sie sind mit Sediment entweder der rolligen Vorkippenschüttung aufgefüllt, bzw. bei Aushalten von Flöz-Zwischenmitteln (Nordfelder) gelangen diese bindigen Sedimente dort hin.

Die Flözlage (*Generalneigung*) gibt den Drehpunkt des Tagebaus und die Anlage der *Zentralen Wasserhaltung* vor. Auch, wenn das *Relief* der Liegendflächen im einzelnen Abweichungen von dieser Neigung aufweist; durch die Anlage der Liegendentwässerungsgräben wird das aufgehende Grundwasser zuerst Abraummassen im Drehpunktbereich aufsättigen. Ausgehend von dort werden die *Liegendentwässerungsgräben* als bevorzugte Zutrittsbahnen wirksam und das Wasser z.B. mit den sulfidhaltigen Liegendschluffsedimenten der Grabenschultern reagieren.

2.2.4 Abraumschnitte – Kippscheiben, Kohleeintrag in die Kippe

Die Abgrabung des Flöz-Deckgebirges mit Eimerkettenbaggern erfolgt in der Regel *mit mehreren Abraumschnitten*. Häufig erfolgt der Abtrag mit 2 Schnitten, wobei mit dem Hochschnitt HS (1. Abraumschnitt) das Quartär, mit dem Tiefschnitt TS (2. Abraumschnitt) das Tertiär-Sediment abgegraben wird, Abbildung 2-13.

Das 2. Lausitzer Flöz zeigt eine mehr oder weniger reliefierte Grenzfläche zu den Hangendschluffen. Zur Minimierung des aschebildenden mineralischen Anteils bei der

Kohleförderung wird bei der Flöz-Freilegung zwischen 10 und 15 cm des obersten Flözabschnitts mit als Abraum aufgenommen. Neben den kohligen Bestandteilen des Hangendschluff gelangt mit dem *kohlefreilegenden Tiefschnitt* somit auch Flöz-Kohle in die Kippe.

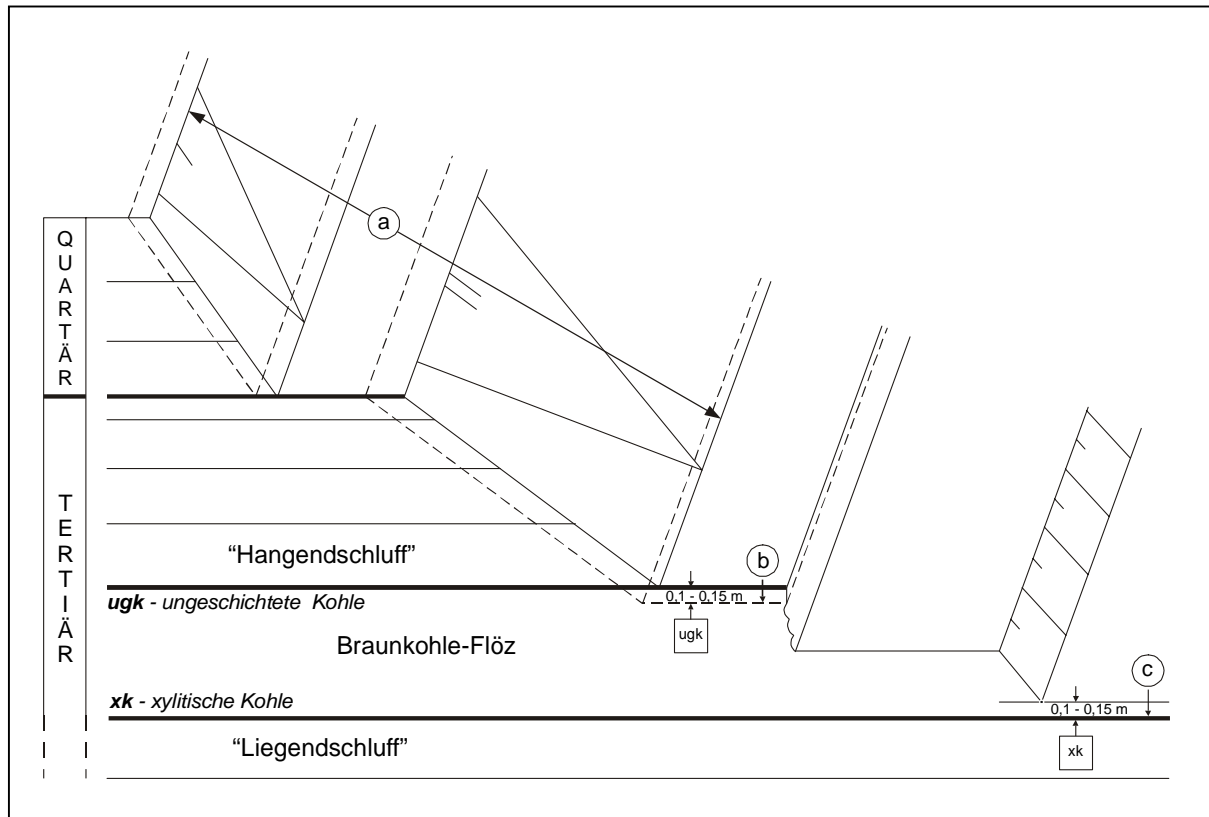


Abbildung 2-13 Schema der Abgrabung des Flöz-Deckgebirges in Hochschnitt HS - 1. Abraumschnitt' und Tiefschnitt TS - 2. Abraumschnitt'', häufig entsprechend Tertiär-Quartär-Grenze (a), Mitabgrabung von 10 bis 15 cm „Ungeschichtete Kohle“ im Hangenden des Flözes (b), Nichtabgrabung von 10 bis 15 cm „Xylitische Kohle“ im Liegenden des Flözes (c), nach G. Voigt 1997.

Bei höheren Deckgebirgsmächtigkeiten und größeren Schnittbereichen der Eimerkettenbagger erfolgt die Verkipfung des Abraums in *mehreren Abwürfen*. Hierdurch wird ein *Aufbau der Kippe aus mehreren Scheiben* erzeugt, jeweils beginnend mit dem Schütten der *Vorkippe* und Planum für den Gleisrost der kippenseitigen Förderbrückenstütze.

Das Aufbringen der Abraummassen über Zwischenabwürfe, „Drittung der Massen für die Hauptkippe“, folgt aus der bodenmechanischen Notwendigkeit der abschnittweisen Wiederbelastung des entlasteten ausgekohlten Tagebauraums, Laube und Warmbold 1984.

2.3 Faktor Kinetik und Sedimentologie des Schüttungsvorgangs

Bei dieser Phase der Deckgebirgsumlagerung werden die *Dichte* und der *petrographische Schichtenaufbau* in den Abraumschüttungskörpern beeinflusst. Diese Eigenschaften sind zur Beurteilung *bodenmechanischer* Wirkungen beim Grundwasseraufgang, Setzung, Verdichtungsfähigkeit, Setzungsfließen von Böschungen zu Restlochseen sowie Böschungen als *Ablösebahnen* für Rutschungen von Bedeutung.

Der Versturz der Abraummassen aus mehreren Metern Höhe in Form einer Abwurfparabel und offenkundigem *Eintrag kinetischer Energie* (Bandgeschwindigkeit) erweckt den Eindruck, daß der Abraum in eine dichte Lagerung überführt wird. In den „Beiträgen zur Strukturforschung an Tagebaukippen“ zeigt Matschak 1969, daß bei der Schüttung rolliger Massen dichtere Bereiche der Abraumschüttung nur im engeren Aufschlagsbereich (1 m) auftreten mit Rohdichten zwischen *1,7 und 1,9 gcm⁻³*, Oberflächenbeprobung. Durch Sondierungen in den Kippen wies er keine derart verursachten Verdichtungszone nach. Der größte Teil der Massen rollt aus dem Aufschlagbereich ab und es besteht für den Abraumschüttungskörper mit Rohdichtewerten zwischen *1,4 und 1,6 gcm⁻³* eine *Auflockerung* im Vergleich zum natürlich abgelagerten Sediment.

Diese Auflockerung geht bei der *Vorkippe* mit Planum für die kippenseitige Brückenstütze noch weiter. Mit den hier verwendeten, 20° abgewinkelten Schurrenblechen erfolgt der „Sedimenteinkbau“ des Kippguts *allein gravitativ* (nicht vom laufenden Förderband) und *geringer kinetischer Energie*. Im *vor nachfolgenden Gleisrücken unbeeinflussten Zustand* (gegenüber Dichtemessung dieser Arbeit), bestimmt Matschak 1969a eine Rohdichte von nur *1,29 g cm⁻³* für diese *Kippscheibe*. Zu dem geringen Wert trägt auch die geringe Verdichtbarkeit der vorzugsweise in der Vorkippe geschütteten *gleichförmigen Sande/Kiese* bei.

Die Sedimente der Flöz-Deckgebirgsschichten werden bei der Gewinnung durch Eimerkettenbagger und Transport durch die Abraumförderbrücke *durchmischt*, Kaubisch 1986. *Beim Abrollen* der Abraummassen auf der Kippenböschung kommt es nach Korn- bzw. Aggregatgrößen, Form und Dichte zu Entmischungen, Umlagerungen und Anlagerung der aus Quarzsand, Kohle, kohligem Substanz und bindigen Bestandteilen zusammengesetzten Abraummassen, Matschak 1969b. Mit nach der Schüttung erfolgenden lawinenartigen *Rutschungen* führen diese Vorgänge teilweise zu lagenweisen Anreicherungen auf den jeweils fortschreitenden Kippenböschungsflächen, die *mit Schüttungsschichten im cm- bis dm-Bereich* die kleinste Einheit im Wechsellagerungsbau der AFB-Kippen bedeuten.

3 Methode der Geologischen Kippenerkundung

Merkmale der zugrundeliegenden *Braunkohlenlagerstätte* einerseits und die Zusammensetzung aus *Geologischem Material* und der *techno-genetisch strukturelle Bau der Abraumschüttungskörper* andererseits begründen als geeignete Erkundungsmethode für diese neu entstandenen Lockergesteinskörper den Einsatz von Bohrungen/Bohrlochmessungen zur räumlichen Erfassung der Parameterveränderung.

Die Geologische Kippenerkundung erfolgt in den Abschnitten „Vorarbeiten“, „Trockenkern- und Spülbohrungen, Bohrlochmessungen“, „Bemusterung und Beprobung“, „Analytik“, „Kennzeichnung der Parameterveränderung im Kippenkörper“.

Als Wissenschaftsdisziplinen genutzt werden die *Strukturdisziplinen Geologie* (Erfassung Eigenschaften Geologischer Körper, einschließlich räumlicher Darstellungsweise), die *stofflichen Disziplinen* (Mineralogie, Geochemie) und Petrophysik.

3.1 Vorarbeiten

1.) Die Auswahl der 2 Braunkohlentagebaue erfolgte nach ihrer Zugehörigkeit zu den insgesamt drei *quartärgeologischen Zonen* des Niederlausitzer Braunkohlenreviers. Aufgrund des vergleichbaren Deckgebirgeaufbaus in den anderen Tagebauen derselben Zone sind – in der Verteilung dabei abhängig von der jeweiligen Technologie – im Grundsatz *ähnliche Eigenschaften* der Abraummischung in diesen AFB-Innenkippen zu erwarten.

2.) So, wie der prinzipielle Bau einer zu erkundenden Lagerstätte (sichtbar an Einstufung in Lagerstättentyp nach Genese und Morphologie) bekannt ist, so muß vor der Erkundung der AFB-Innenkippen ein *Bauschema der jeweiligen Kippe (Kippenmodell)* nach Geologie der Lagerstätte (Geologisches Normalprofil), angewandter Technologie (Abraumschnittführung, Kippscheibenbau) erstellt werden.

Geologische Profilschnitte der Kohlefelderkundung, Rahmenbetriebsplan, Abschlußbetriebsplan und Jahresstands-Plan (Höhenangaben der Liegendfläche und der Kippscheiben in der Entwicklung des Tagebaus/AFB-Innenkippe) sind die hierfür notwendigen Unterlagen.

3.2 Trockenkern- und Spülbohrungen, Bohrlochmessungen

Erkundungsbohrungen bilden die Basis, um zu den notwendigen Rauminformationen zu gelangen. Sie ermöglichen den Geologischen Aufschluß des nur so zugänglichen Inneren der 40 ... 60 m mächtigen AFB-Innenkippenkörper. Zur Gewinnung von Bohrkernen in Kombination mit der bohrlochgeophysikalischen Vermessung wurde ein Programm von je 11 Bohrungen bis zur Kippenbasis (Liegendfläche 2. Lausitzer Flöz) in den beiden untersuchten Kippenmassiven durchgeführt.

Die *Bohransatzpunkte* sind entsprechend den *Hauptrichtungen der Entstehung* der AFB-Innenkippenmassive festgelegt worden. Die beiden untersuchten Abraumschüttungskörper wurden durch Abraumförderbrücken im *Schwenkbetrieb* um einen Drehpunkt aufgebaut. Entsprechend der *Richtungsvorgabe* von Strossen- und Aufschwenkrichtung wurde auf der Grundlage der Jahresstandpläne je ein *radial-konzentrisches Bohrraster* angelegt, Voigt & Oehmig 1996. Die *Profilschnitt-Spuren für die Auswertung* erschließen den Körper der AFB-Innenkippen entsprechend dem techno-stukturgenetischen Bau, Abbildungen 3-1 und 3-2.

Ein reduzierter Erkundungsaufwand wie für einen natürlichen längsgestreckten geologischen Körper mit bekannter Anisotropie der Eigenschaften, wo zwei Profile in den beiden bekannten Hauptrichtungen meist zur Kennzeichnung ausreichen und ein flächiges Raster keinen nennenswerten Informationszugewinn ergibt, war jedoch nicht möglich, da mit *Änderungen in der petrographischen Zusammensetzung der Deckgebirgsfolge innerhalb der Lagerstätte* und Entsprechungen im Kippenkörper zu rechnen war. Mit den in den beiden Kippenhauptrichtungen ähnlichen Bohrungsabständen folgt das Raster der geforderten *gleichmäßigen Flächen- und Volumendeckung* der Erkundungsobjekte.

Mit den vorgesehenen *Finanzmitteln für Bohrungen* wurde mit einer, an der Kippenmächtigkeit orientierten Verteilung von *Trockenkernbohrungen* (Kerngewinnung und geophysikalische Bohrlochvermessung) und *Spülbohrungen* (bohrlochgeophysikalische Vermessung) die maximal mögliche Zahl von Bohrungen realisiert.

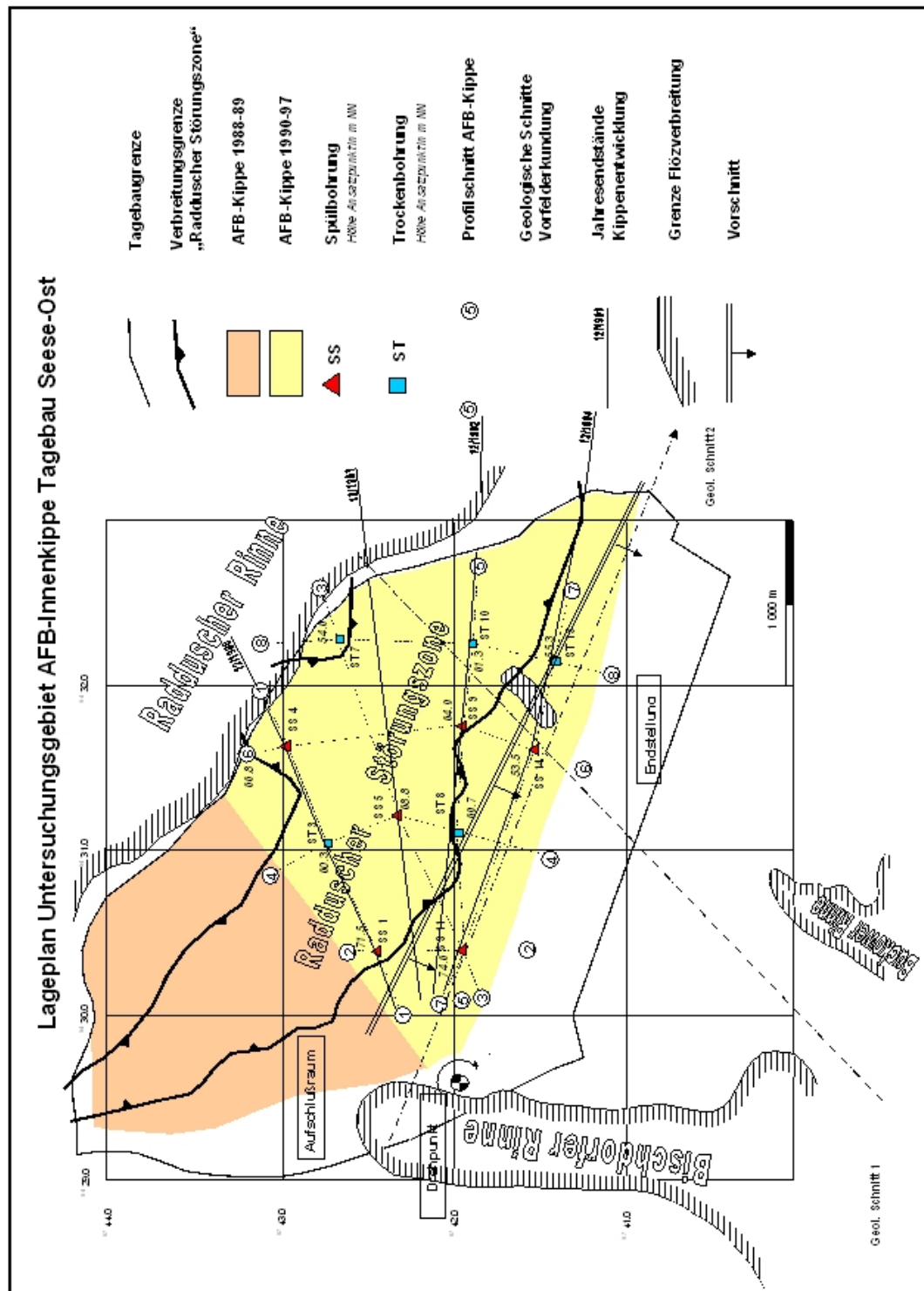


Abbildung 3-1 Lage der Untersuchungsbohrungen (Trockenkern- (□) und Spülbohrungen (Δ) in AFB-Innenkippe Förderbrückentagebau Seese-Ost – Profilschnitt-Spuren orientiert an der strukturgeologischen Aufschwenkrichtung → und Strossenrichtung ↔. Die Systematik der Bohrungsbezeichnung folgt der Entwicklung der Tagebaue nach diesen Richtungen, Voigt & Oehmig 1996, Karte Thiernig 2000, erweitert.

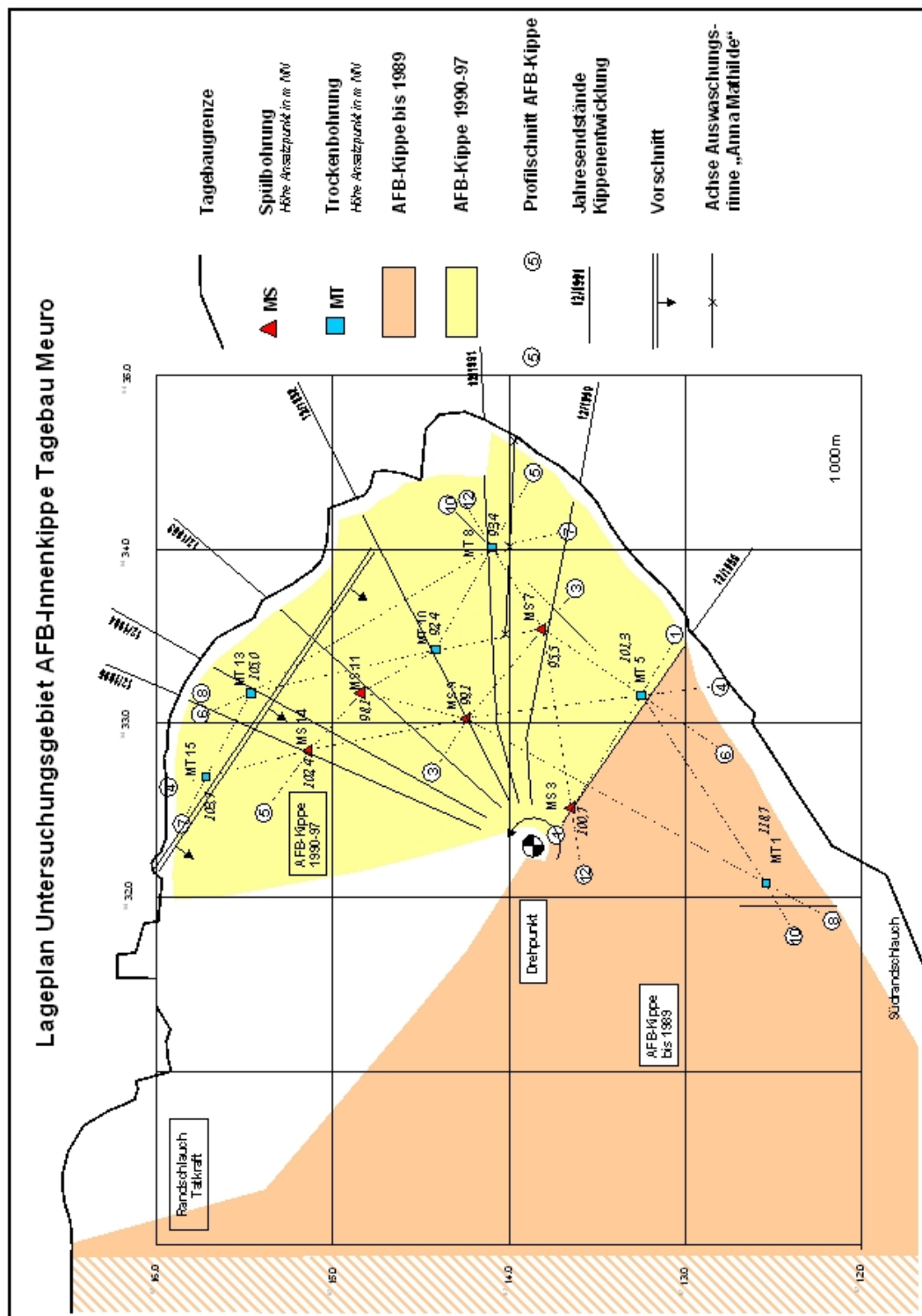


Abbildung 3-2 Lage der Untersuchungsbohrungen (Trockenkern- (□) und Spülbohrungen (Δ) in AFB-Innenkippe Förderbrückentagebau Meuro – Profilschnitt-Spuren orientiert an der strukturgeonetischen Aufschwenkrichtung → und Stossenrichtung ←→. Die Systematik der Bohrungsbezeichnung folgt der Entwicklung der Tagebaue nach diesen Richtungen, Voigt & Oehmig 1996, Karte Thiernig 2000, erweitert.

Erkundungsmethodisches Bindeglied sind die in Kern- und Spülbohrungen durchgeführten geophysikalischen Bohrlochmessungen. Diese dienen zum einen der in-situ-Bestimmung petrographischer und petrophysikalischer Eigenschaften der Schüttungsschichtfolgen in sämtlichen Bohrungen und zum Übertrag der Beziehung zwischen Messungen am Bohrkern und der Bohrlochmessung *von den Trockenkernbohrungen auf die Spülbohrungen*, Kalibration, z.B. Oehmig 1988.

Mittels Messung im Bohrloch der

- natürlichen Gamma-Strahlung (GR-BLM), der
- Dichte (GG-BLM) des bei der Messung wassergefüllten Porenraums und
- Kaliber (Korrektur Bohrlocheinflüsse Gamma-Gamma-Log in Spülbohrungen)

wurden als vielfach benötigter Parameter der petrographischen Zusammensetzung der *Feinkornanteil* sowie die *Porosität* als Ausdruck der Lagerung der Abraumschüttung bestimmt.

Während die Porosität aus der Dichte abgeleitet wird, ist für die Angabe des Feinkornanteils die Kalibration mit den Analysen der Abraummischung aus Bohrkernen notwendig.

Die petrographische Einstufung des Spülguts (Kalk-, Kohle-Anteile) liefert auch bei nur halbquantitativem Charakter in Verbindung mit Ergebnissen von Analysen an Bohrkernmaterial und petrographischer Kernaufnahme wichtige Anhaltspunkte über stoffliche Parameter in der Abraumschüttungsfolge in den nicht gekernten, bohrlochgeophysikalisch vermessenen Spülbohrungen. Die typische lockere Lagerung der Kippen erschwert die Entnahme ungestörter Proben. Entsprechende Bedeutung kommt der Kennwertermittlung in-situ mit Bohrlochmessungen zu.

Das Erkundungsbohr- und Bohrlochmeßprogramm von 22 Bohrungen mit zusammen ca. 1.000 Bohr-m erfolgte in 4 Monaten. Probleme traten bei einzelnen Spülbohrungen auf. Grober trockener Kies, besonders im Liegenden von mächtigen bindigen Kippenstockwerken „saugte“ die Spülung in Größenordnungen auf (Spülungsverlust) und die Bohrung ging zu, so dass nicht in allen Fällen die geplante Bohrteufe bis zum Liegendenschluff erreicht werden konnte, vgl. Tabelle 3-2. Dieser Gesichtspunkt möglicher *Spülungsverluste* ist bei künftigen Erkundungsarbeiten in Kippen für die Aufteilung in Trocken- und Spülbohrungen zu berücksichtigen.

Jeweils direkt nach Abschluß des Bohrungs- und Bohrlochmeßprogramms in den Kippen Seese-Ost und Meuro wurden durch die LMBV, Abteilung Markscheiderei die Ansatzpunkte

der realisierten Bohrungen (GOK) nach *Rechtswert*, *Hochwert* und *Höhe* über NN eingemessen.

Bohrung	Jahresscheibe [19 ...]	Rechtswert	Hochwert	Liegendfläche [m NN]	Oberkante VK [m NN]		Rasensohle [m NN]	Kippenmächtigkeit [m]				Basis Kippe erreicht/ fehlende m	Bemerkungen
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
SS1	1990/91	5430360.11	5742443.79	29,5	41,0		71,5	42,0	37,0 34,5	-	-	n/5,0	
ST3	-, -	5431022.30	5742760.00	31,8	40,0		60,3	28,5	28,0 32,3	26,6 33,7	L, GG	n/1,9	
SS4	-, -	5431665.37	5742997.22	30,5	38,0		66,8	36,3	39,0 27,8	-	? L	j	ab 36 m nach Bohrfortschritt Liegend Schluff
SS5	1991/92	5431209.41	5742325.41	32,4	39,0		68,8	36,4	36,0 32,8	35,6 33,2	L, GG	n/0,8	
ST7	1991	5432293.85	5742697.42	28,6	36,0		54,6	26,0	26,0 28,6	25,6 29,0	L	j	
ST8	1992/93	5431124.69	5741988.96	31,6	39,0		69,7	38,1	40,0 29,7	38,8 30,9	L, GR, GG	j	
SS9	-, -	5431795.34	5741944.68	30,1	38,5		64,9	34,8	31,5 33,4	31,0 33,9	L	n/3,8	
ST10	-, -	5432263.41	5741894.32	31,3	37,5		61,3	30,0	31,0 30,3	30,5 30,8	L, GG	j	
SS11	1993	5430365.90	5741946.50	32,0	40,5		74,6	42,6	42,0 32,6	41,5 33,1	L, GG	n/1,1	
SS14	1994/95	5431639.75	5741509.10	28,1	38,5		53,5	25,4	32,0 21,5	25,7 27,8	GR	j	nicht abgegrabene Kohle und Liegend Schluff erbohrt
ST15	-, -	5432158.24	5741390.52	27,2	38,0		55,3	28,1	25,5 29,8	25,0 30,3	L, GG	n/3,1	

Spalte 1 Bohrungsbezeichnung SS ... – Seese-Ost Spülbohrung, Bohrungsbezeichnung ST ... – Seese-Ost Trockenkernbohrung

Spalte 5-8 (5) Liegendfläche ausgekohelter Tagebau, (6) Oberkante Vorkippe, (7) Oberkante Zwischenschüttung (nicht vorhanden in Seese-Ost), (8) Rasensohle (Geländehöhe Bohransatzpunkt) [m NN]

Spalte 10 Kernaufnahme (Trockenkernbohrung) bzw. Bohrkleinansprache (Rotary-Spülbohrung) bis ... m unter Rasensohle, entsprechend

... m NN

Spalte 11 Kippenbasis, d.h. Flözbasisbereich (nicht abgegrabene xylithische Kohle), tlw. Liegend Schluff erreicht bei ... m unter Rasensohle, entsprechend

... m NN

Spalte 12 Nachweis der Kippenbasis durch:

Kernaufnahme bzw. Bohrkleinansprache (Lithologie) L
Gamma-Log/GR-BLM GR
Density-Log/GG-BLM GG
z.T. Kohle bzw. Schluff, Kippenbasis aber unsicher ?

Kippenmächtigkeit, im Mittel 33,5 m

Tabelle 3-1 Bohrungsübersicht AFB-Innenkippe Tagebau Seese-Ost (Kernbohrungen grau hinterlegt).

Bohrung	Jahresscheibe [19 ...]	Rechtswert	Hochwert	Liegendfläche [m NN]	Oberkante VK [m NN]	Oberkante ZS [m NN]	Rasensohle [m NN]	Kippenmächtigkeit [m]				Basis Kippe erreicht/ fehlende m	Bemerkungen
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
MT1	1989	5432062.10	5712528.45	59,3	72,3	89,3	118,7	59,4	64,0 54,7	62,0 56,7	L	j	
MS3	1989/90	5432518.89	5713624.95	~ 48,1	59,4	71,2	100,7	52,6	41,0 59,7	-	-	n/11,6	erheblicher Spülungsverlust („Kies“) bei 26,8 m 73,9 m NN
MT5	1990	5433164.16	5713233.91	~ 45,0	60,0	69,5	101,3	56,3	52,0 49,3	51,4 49,9	L	j	
MS7	1991	5433543.26	5713814.51	41,7	56,0	62,4	95,5	53,8	54,0 41,5	?	?	?	Spülungsverlust („Kies“) bei 42 m 53,5 m NN
MT8	1991	5434006.52	5714101.60	50,0	61,3	72,6	93,4	43,4	43,0 50,4	41,3 52,1	GR2, GG	j	
MS9	1992/93	5433019.71	5714201.24	44,5	57,9	70,7	99,1	54,6	58,0 41,1	51,2 47,9	GG, GR	j	Spülungsverlust
MT10	1992	5433415.04	5714395.96	47,2	61,4	68,8	92,4	45,2	47,0 45,4	45,2 47,2	L, GG, GR2	j	
MS11	1994	5433178.69	5714835.31	45,2	60,7	65,5	98,1	52,9	44,0 54,1	?	?	?	Spülungsverlust („Kies“) bei 30 m 68,1 m NN
MT13	1995	5433187.07	5715452.04	51,0	64,4	77,7	105,3	54,3	57,3 47,7	54,0 51,0	GG, GR	j	
MS14	1995	5432832.12	5715126.82	44,4	60,5	66,0	102,4	58,0	55,0 47,4	52,5 49,9	GR	?	Spülungsverlust („Kies“) bei 20 m 82,4 m NN
MT15	1996	5432691.08	5715716.41	47,6	63,7	74,5	103,7	56,1	54,0 49,7	50,6 53,1	GR, GG	j	

Spalte 1 Bohrungsbezeichnung MS ... – Meuro Spülbohrung, Bohrungsbezeichnung MT ... – Meuro Trockenkernbohrung

Spalte 5-8 (5) Liegendfläche ausgekohlter Tagebau, (6) Oberkante Vorkippe, (7) Oberkante Zwischenschüttung, (8) Rasensohle (Geländehöhe Bohransatzpunkt) [m NN]

Spalte 10 Kernaufnahme (Trockenkernbohrung) bzw. Bohrkleinansprache (Rotary-Spülbohrung) bis ... m unter Rasensohle, entsprechend

... m NN

Spalte 11 Kippenbasis, d.h. Flözbasisbereich (nicht abgegrabene xylithische Kohle), tlw. Liegend Schluff erreicht bei ... m unter Rasensohle, entsprechend

... m NN

Spalte 12 Nachweis der Kippenbasis durch:

Kernaufnahme bzw. Bohrkleinansprache (Lithologie) L
Gamma-Log/GR-BLM GR
Density-Log/GG-BLM GG
z.T. Kohle bzw. Schluff, Kippenbasis aber unsicher ?

Kippenmächtigkeit, im Mittel 53,4 m

Tabelle 3-2 Bohrungsübersicht AFB-Innenkippe Tagebau Meuro (Kernbohrungen grau hinterlegt).

3.3 Bemusterung und Beprobung

Die Abraummischung der *1m-Bohrkernstrecken* wurde petrographisch aufgenommen und Schichtenverzeichnisse nach DIN 4022/4023 erstellt. Aus den beiden untersuchten AFB-Innenkippenmassiven wurden *469 Meterproben* von durchschnittlich 12,6 kg gewonnen. Seese-Ost: 151 Proben, Meuro; 318 Proben.

Auf der Grundlage der direkt nach Abschluß von Bohr- und Bohrlochmeßprogramm vorliegenden Bohrlochmessung GR-Log und bekannter Schüttungstechnologie konnten folgende Merkmale im Bau der Abraumschüttungsfolgen für die *Festlegung eines geeigneten Probenintervalls* herangezogen werden:

- die *Kippscheiben* aus den einzelnen Abwürfen (7-35 m),
- die mit den Rückstadien des Förderbrückenverbandes entstandenen *Schüttungsrippen* (4-7 m), sowie
- *Schüttungsschichten* (cm ... dm Bereich), die innerhalb eines Rückstadiums zu einer Schüttungsrippe aufwachsen.

Innerhalb einer Schüttungsrippe sind die Eigenschaften des in einem Rückstadium abgegrabenen Deckgebirgeabraums erfaßt. Als Probenintervall im Bereich der durchschnittlichen Mächtigkeit dieses mittleren Strukturelements der AFB-Innenkippe wurde das 5 m-Intervall festgelegt. Somit konnten 5 m-Sammelproben hergestellt werden, was neben dem *strukturangepassten Intervall* gleichzeitig den auf 1/5 *reduzierten Analysenaufwand* bedeutet. Für die *Auswertung der Bohrlochmessungen* und Kalibration ist wichtig, daß hierbei ebenfalls das 5 m-Intervall zugrundegelegt wird und die in 10 cm-Abständen ausgewiesenen Meßwerte 5 m-weise zusammengeführt werden.

Herstellung von 5m-Sammelproben – Probenteilung - Besonderes Kennzeichen des Deckgebirgeabraums in der Kippe ist, daß er als *Mischung* auftritt. Petrographisch unterschiedlich zusammengesetzte Bestandteile des Deckgebirges (Quarzsand, Geschiebemergelbrocken, Hangendschluff, Kohle/Kohlige Substanz, Kies) liegen unmittelbar nebeneinander vor. Innerhalb eines Ausschnitts der Abraummischung (Probe) führt dies z.B. zur Verringerung der Streuung der Korngrößenverteilung im Vergleich zur anstehenden Deckgebirgsschichtenfolge, Fischer & Kaubisch 1992.

Das aufgehende Grundwasser tritt in die geschüttete Mischung des Flöz-Deckgebirges ein. Für Aussagen zu den damit verbundenen bodenmechanischen und hydrogeochemischen Wirkungen muß der an einer Probe bestimmte Parameter die Verhältnisse in dieser Mischung

wiedergeben, muß *repräsentativ* sein. Ausgangspunkt für die herzustellende 5m-Sammelprobe muß demnach das *vollständige Bohrkernmaterial* sein, respektive eine nach teilungsmethodischen Grundsätzen hergestellte Teilprobe, Rasemann et al. 1998, Rasemann 2001.

Die für sämtliche Analysen *erforderliche Probenmasse* beträgt einschließlich Rückstellmengen 1 kg/Probe. Die Teilprobe für die Analyse muß *repräsentativ für das 5m-Kippenintervall* sein, d.h. die in den 1m-Ausgangsproben enthaltenen Merkmale müssen in die Analysenprobe (5m-Mischprobe) gelangen.

Entsprechend diesen Vorgaben wurde mit einem *Viertelungsverfahren* in sechs Teilungsschritten von jeder Meterprobe eine Teilprobe von etwa 200 g erzeugt, Abb. 3-3. Die Verjüngung der Ausgangsproben und Bereitstellung von Rückstellproben erfolgte dabei per *Aufkegeln und Vierteln* mit einem Teilungskreuz und *sorgfältigem Mischen* zwischen den einzelnen Teilungsschritten. Jeweils fünf aufeinanderfolgende der Meterproben (ca. 200g) wurden *zu einer 5 m- Probe* zusammengefasst und zur Sieb- und Schlämmanalyse mit quantitativer Abtrennung und Bereitstellung von Korngrößenfraktionen für die weitere Analytik gegeben.

Die Probenmassen der damit hergestellten Korngrößenfraktionen

- 2.0-0.063 mm (Sand)
- < 0.063 mm (Feinkorn)

wurden mit einem Rotationsprobenteiler (Teilungsverhältnis 1:8) auf für die verschiedenen Analysengänge erforderlichen Teilprobenmassen incl. Rückstellproben verjüngt.

Probenbezeichnung - Die Bezeichnung der Proben ist aus der *Bohrungsnummer* und dem *Probenintervall* (*zugrundeliegende 1m-Probe*), das sie repräsentiert zusammengesetzt, z.B. Bohrung ST3.

Probe repräsentiert den Probenbereich von jeweils 1 m Mächtigkeit
ST3.15	0-6
ST3. 610	6-10
ST3. 1115	11-15
ST3. 1620	16-20
ST3. 2125	21-25
ST3. 2628	26-28

Abbildung 3-3 Teilungsplan zur Herstellung der Proben für die Bestimmung petrographischer und mineralogisch-geochemischer Parameter der Abraummischung, Beispiel AFB-Innenkippe Meuro, Voigt & Oehmig 1996.

3.4 Analytik

Proben - Für die Analyse der petrographisch-stofflichen Eigenschaften an Bohrkernmaterial sowie der petrophysikalischen Eigenschaften der Abraummischungsfolge mit Geophysikalischen Bohrlochmessungen liegt *einheitlich das 5m-Probenintervall* zugrunde. Das heißt, die petrographische und chemische Analyse erfolgte an aus den 1 m-Bohrkern-Proben gewonnenen *5m-Mischproben* und die von den Bohrlochmessungen im Abstand von 10 cm vorliegenden Meßwerte wurden *5m-weise zusammengeführt* (arithmetischer Mittelwert).

Korngrößenverteilung – Zur *Korngrößenanalyse* und *-fraktionierung* wurde die kombinierte Sieb- und Schlämmanalyse nach DIN 18123 (ohne Zugabe von H₂O₂) durchgeführt, Fa. G.E.O.S., Freiberg, Sachsen.

Chemische Analyse an Korngrößenfraktionen – An den Fraktionen 2 mm bis 0,063 und < 0,063 mm und wurde die Konzentration der Elemente C, S, Fe, Al, Ca, Ti, Mn, Co, Ni und Zn bestimmt. Die Analysen wurden vom ZAL, BTU Cottbus durchgeführt. Gesamtschwefel- und Gesamtkohlenstoffgehalt wurden durch Verbrennung der Probe im Sauerstoffstrom und coulometrische Detektion des freigesetzten SO₂- bzw. CO₂-Gases bestimmt. Die übrigen Elemente röntgenfluoreszenzanalytisch.

Geophysikalische Bohrlochmessungen – Mit diesen Meßverfahren werden bei der Aufwärtsbewegung der Meßsonden kontinuierlich petrophysikalische Eigenschaften der durchteuften Schichtenfolge *in-situ*, d.h. hier im Verband der lockeren Abraumschüttungsfolgen gemessen. Über die am häufigsten genutzten Verfahren, physikalisches Meßprinzip sowie Auswertung und Interpretation informieren z.B. Meinhold 1965, Hatzsch 1994, Fricke & Schön 2000. Das Bohrloch-Meßprogramm wurde von der Fa. BLM, Storkow bei jeweils wassergefülltem Bohrloch durchgeführt. Die Bohrlochmessungen GAMMA-Log, DENSITY-Log und KALIBER wurden für Auswertungen in dieser Arbeit herangezogen.

Direkt nutzbar ist die Dichtemessung zur Ermittlung der aktuellen Porosität in den Abraummischungskörpern. *Über die Kalibration* mit den Ergebnissen aus der Analyse am Bohrkern das GAMMA-Log für den Feinkornanteil.

Die Merkmale der Geophysikalischen Bohrlochmessungen hinsichtlich der Parameterbestimmung für die Kennzeichnung der Reaktionskörper AFB-Innenkippe werden in nachstehend aufgeführten Abschnitten erläutert:

- 3.2 Trockenkern- und Spülbohrungen, Bohrlochmessungen,
- 5.3.1.1 Kalibration des GAMMA-Logs (GR-BLM) zur Anzeige des Feinkornanteils,
- 5.4.1.1 Ermittlung des Durchlässigkeitsbeiwertes aus Parametern der Korngrößenverteilung,
- 5.5.1 Dichte,
- 6.2.2 Kohlenstoffgehalte – Spülbohrungen,
- 6.3.2 Aluminiumgehalte – Spülbohrungen,
- 6.4.1 Calciumgehalte – Spülbohrungen.

3.5 Kennzeichnung der Parameterveränderung im Kippenkörper

Die Ergebnisse aus den Analysen an Bohrkernmaterial und den geophysikalischen Bohrlochmessungen werden ausgewertet und die gemessenen bzw. abgeleiteten petrographischen, stofflichen und petrophysikalischen *Eigenschaften der Abraummischung* Seese-Ost und Meuro als *Teufenprofile der einzelnen Bohrungen* dargestellt. In einem mehrstufigen Verfahren wird daraus das *Bild* über die Veränderung der Eigenschaften im Kippenkörper entwickelt. In dieser Arbeit stehen dabei zwei Ziele im Vordergrund.

Ziel I - Das Erkundungsergebnis, die *vertikale und laterale Parameterveränderung* der Eigenschaften ist darzustellen. Dies ist Grundlage für die Fachdisziplinen, die unter Einbeziehung der durchlässigkeits- und richtungsabhängigen Grundwasserströmung im Kippenkörper sowie den Übergängen zu angrenzenden Bereichen in der Bergbaufolgelandschaft Modelle für die *Grundwasserstandsentwicklung* und die *Stoffausbreitung* konzipieren und berechnen.

Ziel II – Wesentlich bestimmt die pH-Wertentwicklung des Kippenwassers dessen Belastung mit Inhaltsstoffen aus Folgereaktionen und muß somit zur Bewertung des Einflusses auf die angrenzenden Restlochseen und Grundwasserleiter-Stockwerke im Gewachsenen bekannt sein.

Auf der Basis der *erkundeten räumlichen Verteilung* der Konzentrationen der hierfür maßgebenden Stoffe FeS₂ (S) und CaCO₃ (Ca) ist eine Modellvorstellung über den *Ablauf der Versauerungs- und Pufferreaktion* beim Grundwasseraufgang zu konzipieren, mit der bilanzierend der *pH des Kippenwassers* angegeben werden kann.

3.5.1 Teufenprofile der Parameter – Bohrungen in Strossen- und Aufschwenkrichtung

Die an Bohrkern und mittels Bohrlochmessung bestimmten Eigenschaften der Abraummischung werden für die einzelnen Bohrungen, angeordnet in Profilschnittspuren nach *Strossen- und Aufschwenkrichtung* dargestellt und die *Werte* sowie deren vertikale und laterale *Veränderung* interpretiert. Bei dieser Stufe der Erfassung der räumlichen Eigenschaftsänderungen wird außerdem der *Zusammenhang* zwischen petrographisch-/stofflichen und petrophysikalischen Eigenschaften aus den Bohrlochmessungen untersucht.

Dazu werden die Feinkornanteil – GAMMA-Log Relationen sowie für Stoff-Parameter die *Feinkornanteil - Elementgehalt-Relationen* aufgestellt und mit der petrographischen Spülgutansprache in Verbindung mit *Bohrkernanalytik* und petrographischer *Kernaufnahme* genutzt.

	Trocken-Kernbohrungen	Spülbohrungen
Gefüge	Parameter der Korngrößenverteilung, darunter Anteil Fraktion < 0,063 mm	GAMMA-Log + Bohrkern (Kalibration) - Feinkornanteil (< 0,063 mm)
	Durchlässigkeitsbeiwert k_f (über Feinkorn)	- Durchlässigkeitsbeiwert
	Porenzahl n (DENSITY-Log)	DENSITY-Log - Dichte wassergefüllter Porenraum - Porenzahl n
Stoff	C, FeS ₂ (S), Fe Al, Ti CaCO ₃ (Ca), Mn Co, Ni, Zn	FeS ₂ (S), in Meuro Al CaCO ₃ (Ca)

Zur Konstruktion der kippengeologischen Profilschnitte kann somit für die Eigenschaften, die für die Kennzeichnung der „AFB-Innenkippen als Reaktionskörper“ notwendig sind, größtenteils auf die Information aus *allen Bohrungen* zurückgegriffen werden.

3.5.2 Konstruktion kippengeologischer Profilschnitte

Die Parameter FeS₂ (S), CaCO₃ (Ca), Al, Feinfraktionsanteil (<0,063 mm), k_f sind hinsichtlich Versauerungs- und Pufferreaktion sowie Elementfreisetzung und Beurteilung der Wasserwegsamkeit wesentlich.

Abhängig von der Variabilität der Eigenschaften werden *Wertebereichsgrenzen* zur Konstruktion von Isolinen festgelegt. In den strukturgenetisch verlaufenden Hauptrichtungen der AFB-Kippen (=Profilschnittspuren) werden Isolinenpläne konstruiert. Mit den *Flächen gleicher Parameterwert-Bandbreite* werden die Veränderung oder Konstanz der Eigenschaften der Abraummischung in die *Hauptrichtung des Schüttungsvorgangs*, der *Strossenrichtung* (Bewegungsrichtung des AFB-Verbandes) und in Tagebau-Aufschwenkrichtung wiedergegeben.

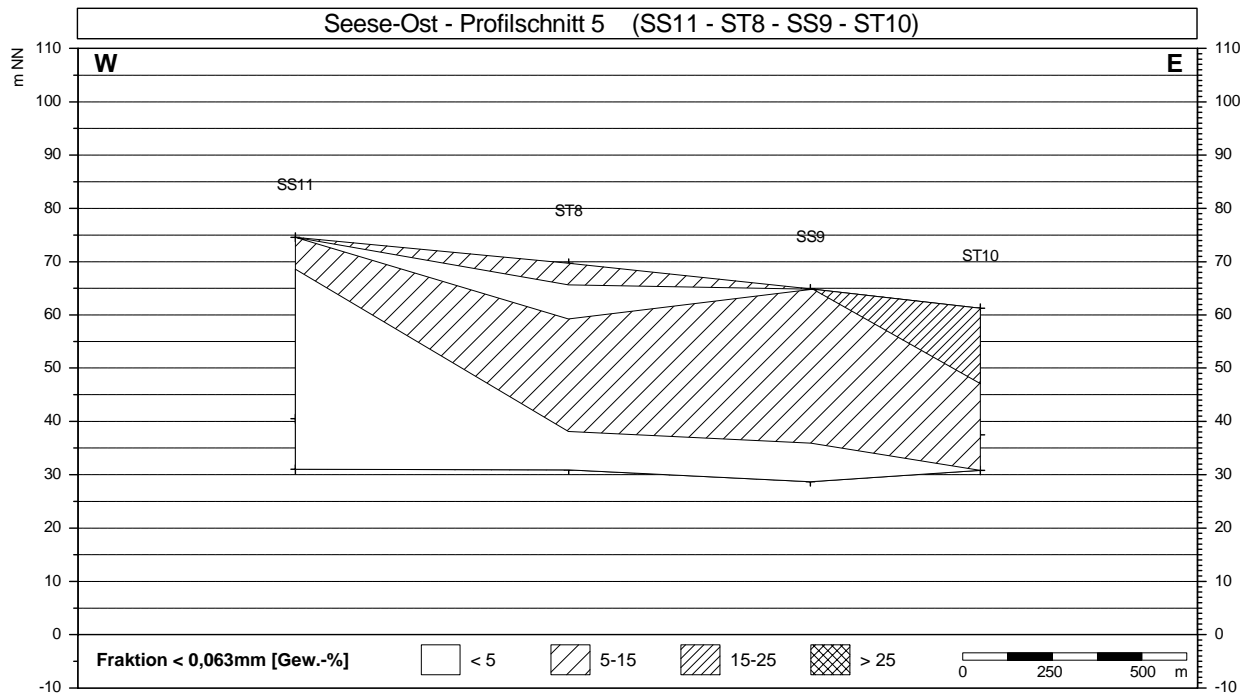
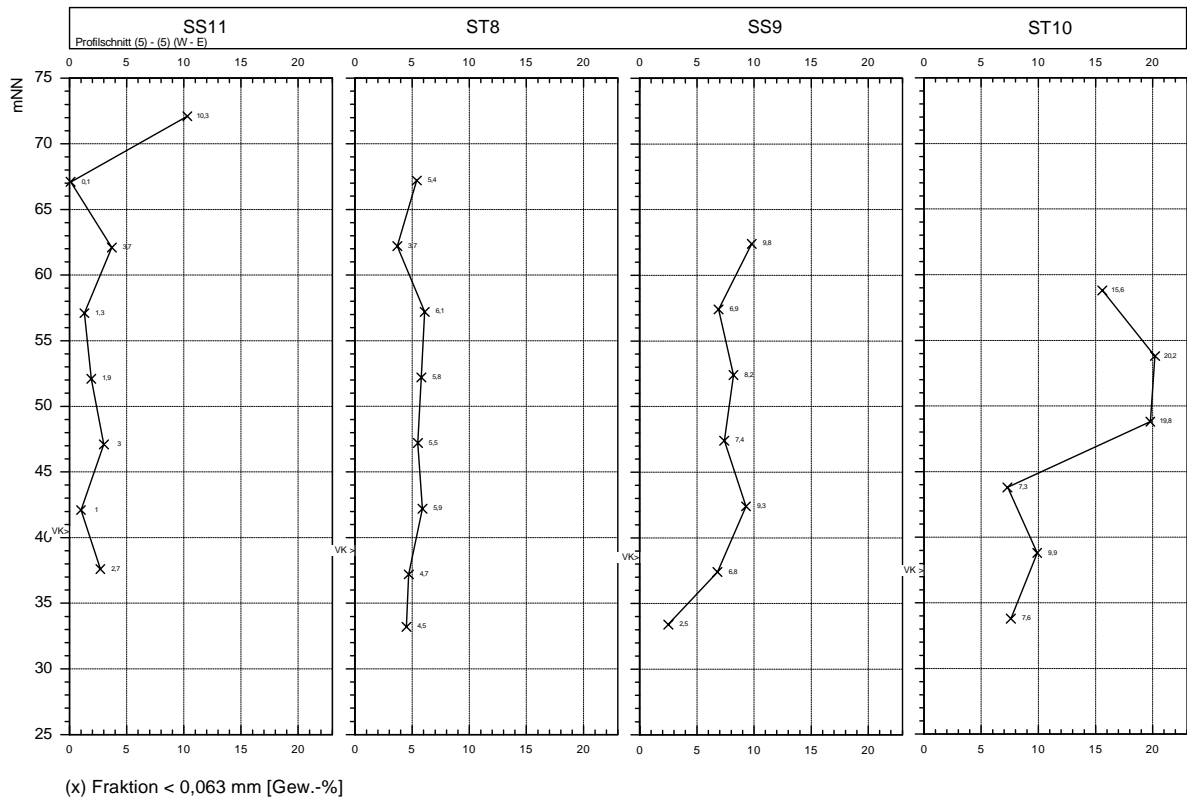


Abbildung 3-4 Kennzeichnung der Parameterveränderung im Kippenkörper – Beispiel Fraktion < 0,063 mm, Seese-Ost, (oben) Tiefenprofile, (unten) Konstruierter Profilschnitt.

3.5.3 Raumbild –Intervalle des Grundwasserwiederanstiegs

Raumbild

Um die Veränderung der Eigenschaften der Abraummischung vertikal und zugleich in der Hauptrichtung des Schüttungsvorgangs (Strossenrichtung) und der Tagebau-Aufschwenkrichtung beurteilen zu können, wurden die Bohrungen im Raumbild aufgestellt (vgl. isometrische Darstellung) und *Körper gleichen Parameterwertebereichs konstruiert*.

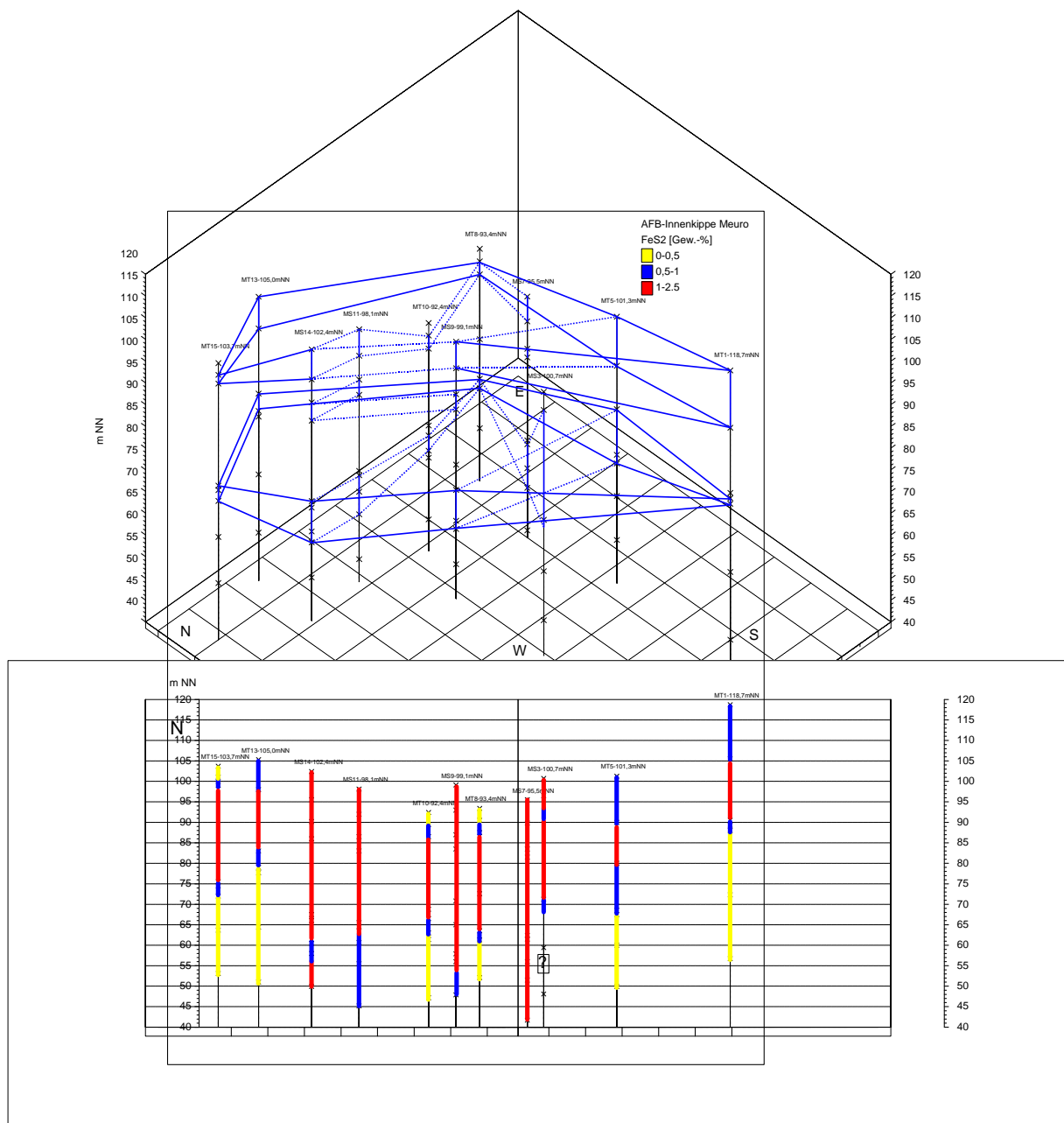
Die Konstruktion folgt der Entwicklung des Abraumschüttungskörpers in den genannten Hauptentstehungsrichtungen. *Standpunkt des Betrachters* ist der Drehpunkt des Tagebaus.

Intervalle des Grundwasserwiederanstiegs

Grundüberlegung für das Prognose-Modell dieser Arbeit zur *pH-Wertentwicklung im Kippenwasser* ist (Abschnitt 7.1.3.1), daß das aufsteigende Grundwasser sukzessive mit der Abraummischung reagiert und sich nach den enthaltenen Mengen FeS_2 (S) und CaCO_3 (Ca) und der *Bilanz* aus Versauerungs- und Pufferreaktion innerhalb von *Teufenintervallen* beim Wasseraufstieg eine bestimmte Beschaffenheit des Kippenwassers einstellt.

Zur Veranschaulichung der zugrundeliegenden *vertikalen stofflichen Veränderung* in der Abraummischung wurden die Bohrungen aus der Raumbilddarstellung auf eine Vertikalebene durch den Standpunkt des Betrachters projiziert, bei 0° Neigung.

Aus dieser Darstellung können die Konzentrationen in einem Wert je Teufenintervall über die gesamte Kippenfläche zusammengeführt und auf die *Formierung und Änderung der Kippenwasserbeschaffenheit* geschlossen werden. Entsprechend der erreichbaren *Tiefenauflösung* durch das Probenintervall wird der Grundwasseranstieg und die Reaktion 5m-weise unterteilt.



4 Deckgebirgsgeologie - Bauschema der AFB-Innenkippen

Nach Deckgebirgsgeologie (petrographische Zusammensetzung und Mächtigkeit) und den Schnittbereichen bei der Abraumgewinnung wurde aufgrund von Unterlagen der Kohlefelderkundung (Geologisches Normalprofil) und Tagebautechnologie (Abraumschnittführung, Kippscheibenbau) das Bauschema der beiden untersuchten AFB-Innenkippen erstellt, Abbildungen 4-3 und 4-5. Die regionalgeologischen Zusammenhänge, von Bedeutung für die *Repräsentanz der Untersuchungstagebaue* für die Tagebaue derselben Geologischen Zone sind im Abschnitt „2.1 Geogener Faktor – Regionale geologische Verhältnisse“ erläutert.

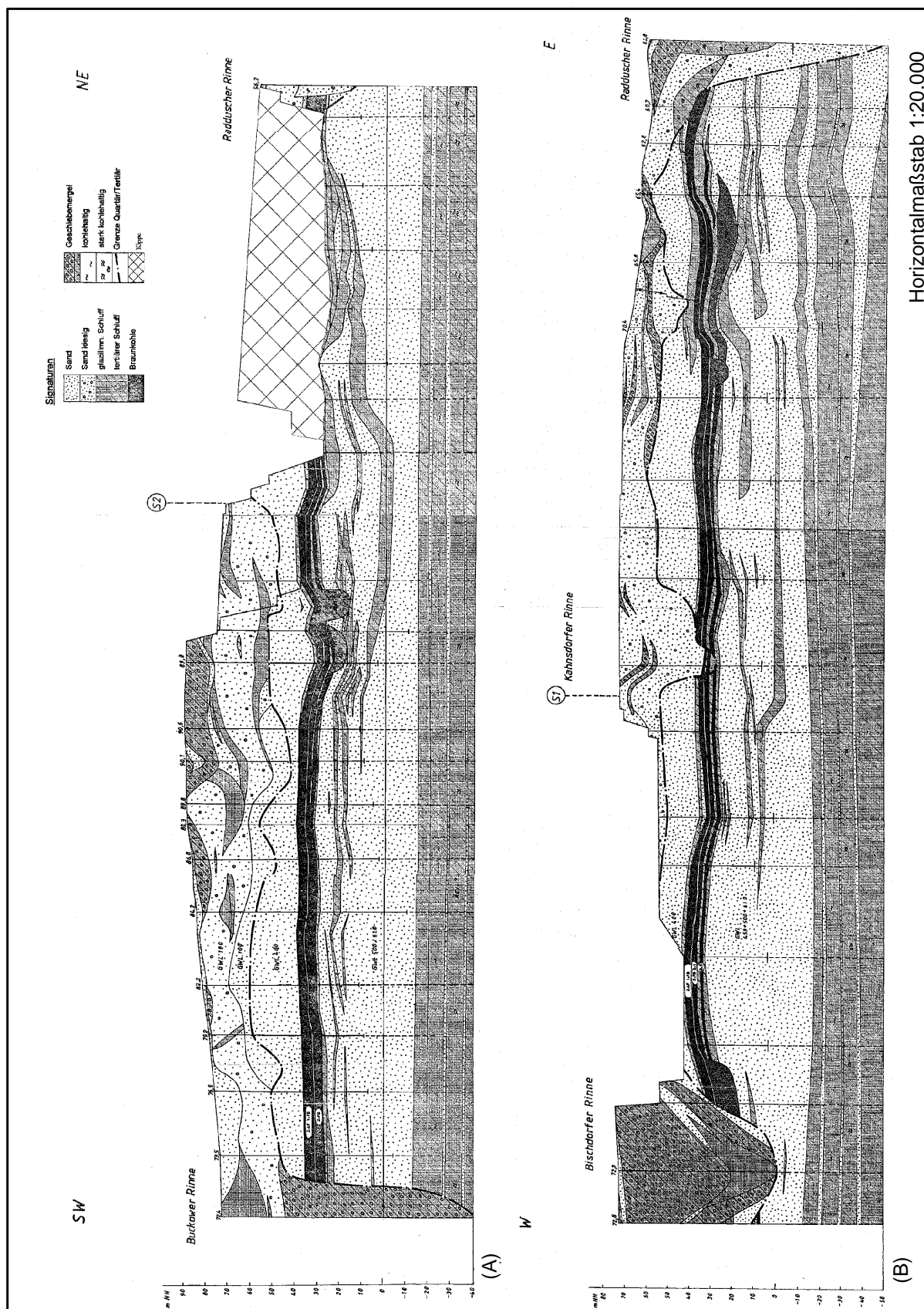
4.1 AFB-Innenkippe Tagebau Seese-Ost

Der Tagebau Seese-Ost liegt im Bereich der glazialen Hochfläche des Niederlausitzer Grenzwalls. Auf dieser Fläche, rückwärtig zu den Ablagerungen der eigentlichen Eisrandlage sind saaleglaziale Grundmoränen mit *Lehmböden*, die sich auf *Geschiebemergel* entwickelt haben, charakteristisch für das oberflächennahe Quartär (GWL 100). Innerhalb des Kohlenfeldes, das von *pleistozänen Rinnen* mit zum Teil elsterglazialer Basis umgrenzt wird, erreicht das Flözdeckgebirge aus Tertiär und Quartär von Norden nach Süden 30 bis 40 m Mächtigkeit.

Die *Pleistozänbasis* steigt von 38-45 m NN im Bereich der Radduscher Rinne im Nordosten auf + 90 m NN im Südwesten, wo sie im Bereich der Dubrauer Höhe die Geländeoberfläche erreicht. Auf der Linie Ortschaften Göritz – Raddusch – Boblitz bildet der Hochflächenrand eine morphologisch deutliche Grenze zur nordöstlich anschließenden Talaue des Baruther Urstromtals mit Geländehöhen um + 50 m NN.

Das *tertiäre* Flözdeckgebirge wird im wesentlichen durch die *Seeser Sande* gebildet (GWL 400). Die *schluffarmen Quarzsande*, überwiegend *Mittelsand* mit einzelnen *Grobsand- und Kieslagen* mit einer charakteristischen nordischen Geröllgemeinschaft lagern zum Teil erosionsdiskordant auf dem *Hangendschluff* des 2. LF, lokal auf dem Kohleflöz. Sie vertreten in Seese wie in den anderen nördlichen Randfeldern (z.B. Schlabendorf) den unteren Teil der Oberen Briesker Folge des südlichen und zentralen Reviers. Charakteristische *Störung* der normalen Ablagerungsverhältnisse sind bis 60 m große *Tertiärschollen* in den *pleistozänen* Ablagerungen.

Abbildung 4-1 (folgende Seite) Geologische Schnitte Tagebau Seese-Ost, (A) SW – NE, (B) W – E, aus Rahmenbetriebsplan Tagebau Seese-Ost (ab 1994), LAUBAG.



Einheiten des geologischen Baus im Bereich Tagebau Seese-Ost - Innerhalb des erkundeten Teils der AFB-Innenkippe Seese-Ost (Jahresscheiben 1990-1997) können nach Thiemig 2000, Bereiche mit jeweils besonderem geologischen Bau und entsprechend Schichtenfolge ausgewiesen werden, Anlagenheft „Lageplan Untersuchungsbohrungen – Einheiten des Geologischen Baus AFB-Innenkippe Tagebau Seese-Ost“. Mit *NW-SE Längserstreckung* lassen sich „Radduscher Rinne“ – „Radduscher Störungszone“ – „Bereich südwestlich der Radduscher Störungszone“ abgrenzen. Quer zu diesen Zonen verläuft die „Kahnsdorfer Rinne“.

Radduscher Rinne – Die „Radduscher Rinne“ ist ein im äußersten Nordosten gelegenes Element des Systems aus *NW-SE verlaufenden Hauptrinnen* mit annähernd quer verlaufenden Nebenrinnen in NNE-SSW-Erstreckung im Niederlausitzer Braunkohlenrevier, Kupetz et al. 1989. In der, zur Krausnick – Burg – Peitz – Gubener Hauptrinne führenden pleistozänen Erosionsform, liegen über geringmächtigem grundmoränenartigen Material an der Basis ca. *100 m gleichförmige Sande* mit *umgelagertem Tertiär* (kaum transportiert), Nowel 1995.

Die Grenze der „Radduscher Rinne“ im Südwesten entspricht der Nordostgrenze der Verbreitung des Kohleflözes, die als Grenze der Flözverbreitung (Kohle-Null Linie) eingetragen ist. Für die Position der *Untersuchungsbohrung ST7* außerhalb des Bereichs der „Radduscher Rinne“ gilt, daß im Gegensatz zur südwestlich anschließenden „Radduscher Störungszone“ hier vorbergbaulich die *ungestörte Deckgebirgsfolge* aus tertiärem und quartärem Sediment anstand. Entsprechend dem generellen Absinken der Pleistozänbasis nach Nordosten vor allem mit quartären Sedimenten.

Radduscher Störungszone - Untersuchungsbohrungen SS1, ST3, SS4, SS5, SS9, ST10. Der Großteil des untersuchten Kippenmassivs Seese-Ost gehört zu dieser Zone. Gegenüber der normalen Schichtenfolge tertiärer und auflagernder pleistozäner Sedimente besteht eine „gestörte“ Lagerung der Schichten. Charakteristisch sind bis 60 m große *tertiäre* Flaschentonsschollen innerhalb eines *pleistozänen* Geröllhorizontes.

Die Abfolge im Bereich der „Radduscher Störungszone“ läßt sich in diskordant den Seeser Sanden auflagernde *überwiegend rollige* quartäre Bildungen (mit Schollen bindigen Materials), sowie einsetzend mit Geschiebemergel einen *durchgehend bindigen* Hangendbereich einteilen.

Basierend auf Thiemig 2000, ist für diesen Kippenteil die *Schichtenfolge* nach Lithologie-, Verband- und Lagerungsverhältnissen in Abbildung 4-2 wiedergegeben. Wirksam für die räumliche Änderung der petrographischen Zusammensetzung des Kippenmassivs ist die nach Nordosten, zur „Radduscher Rinne“ hin stetig tieferliegende Basis des Quartär.

Quartär	bindige Folge, stark gestört	<div style="text-align: center;"> SW NE Q T </div>	fS, glazilimmisch, in Oberflächennähe <i>verockert</i> und <i>lehmhaltig</i>
			Beckenschluff (Bänderung nicht immer deutlich) dunkelgrauer bis schwarzer Schluff
			fS, glazilimmisch
			S/U-Wechselagerung, stark kohlehaltige Fs-Lagen konkordant auflagernd
			Beckenschluff, meist als Bänderschluff, 0,3-3 m
Tertiär/Quartär	rollige quartäre Bildungen, bindige Schollen		Geschiebemergel, zum Teil Bänderung an der Basis, kein hoher Schluffanteil, zum Teil unmittelbar auf Tertiär, dünnt in Mulden bis auf wenige cm (0 cm) aus
			fS-gS, wechselnde Mächtigkeit, Pleistozän, kein Kies, Steine und bindige Schollen
			<div style="display: flex;"> <div style="flex: 1;">Seeser Sande, 17 ... 13 m</div> <div style="flex: 1;">Geröllschicht, 0,3-3 m, diskordant auf Seeser Sanden bzw. Hangendschluff, flächenhaft verbreitet, fehlt nur, wo bindiges Pleistozän unmittelbar auf Tertiär, gS-gG mit Steinen, Geschiebemergel- und Flaschentonschollen, Großschollen (10-60 m) durch vermehrte Steinführung in der Umgebung angekündigt</div> </div>
			Hangendschluff, Ø 1,5 m (0,5-2,5m)
			2. LFH

Abbildung 4-2 Tertiär- und Pleistozän-Schichtenfolge im Bereich der „Radduscher Störungszone“, nicht maßstäblich, nach Angaben Thiemig 2000.

Über die *Tiefenreichweite der Verwitterung* in die pleistozänen Sedimente an der Erdoberfläche – „*verockert und lehmhaltig*“ im obersten Teil der Folge – informiert Nowel 1995. In einem Profilschnitt aus der Erkundung Kohlenfeld Seese-Ost beschreibt er das Profil nach oben abschließend „5-7 m Grundmoränensedimente (Geschiebemergel), in den oberen 3-4 m tiefgründig entkalkt und verlehmt, darunter 1-3 m kalkhaltig.“

Bereich südwestlich der Radduscher Störungszone - Untersuchungsbohrungen SS11, ST8, SS14, ST15. Gegenüber der Störungszone ist hier die normale Deckgebirgsfolge entwickelt. Tertiäre und pleistozäne *Fein- bis Mittelsande* bilden den Hauptteil des Flöz-Deckgebirges.

Die Grenze zur „Radduscher Störungszone“ fällt in etwa mit der Linie zusammen, südwestlich von der wegen der hohen Deckgebirgsmächtigkeit Abraum auch im *Vorschnitt* abgebaggert wurde. Davon wurden auch die hier nur geringmächtigen Geschiebemergel erfaßt, die zusammen mit den Tertiär-Vorschnittmassen im Tagebau Seese-West verkippt wurden. Durch den Abtransport quartären Deckgebirges wird für diesen *südwestlichen Randbereich des Innenkippenmassivs* die ohnehin bestehende *Vormacht der tertiären Deckgebirgsanteile* noch verstärkt. Zudem wird die ehemalige topographische Geländehöhe durch den Kippenkörper nicht mehr erreicht.

Kahnsdorfer Rinne – Untersuchungsbohrung ST10. Die „Kahnsdorfer Rinne“ zieht sich in der nordöstlichen Verlängerung der im Südwesten gelegenen „Buckower Rinne“ nach Nordosten durch das Tagebaufeld Seese-Ost hindurch, Nowel 1995.

Durch Erosion und spätere Akkumulation von Ablagerungen im Pleistozän liegt die *Quartärbasis hier deutlich tiefer* als in den südöstlich und nordwestlich angrenzenden Gebieten, häufig direkt auf dem Kohleflöz. Im untersuchten Kippenbereich durchschnitt sie das Kohleflöz unterhalb der ehemaligen Ortslage Kahnsdorf, in etwa entsprechend der eingetragenen Grenze der Flözverbreitung. Rinnenfüllung sind *bis 25 m glazifluviale Kiessande* sowie *Fein- bis Mittelsande von umgelagerten Seeser Sanden*. Es überwiegt rollige, durchlässige Füllung. Außerdem enthalten ist in unregelmäßiger Form als Fließtill eingelagertes Grundmoränenmaterial, *Geschiebemergel*, Nowel 1995.

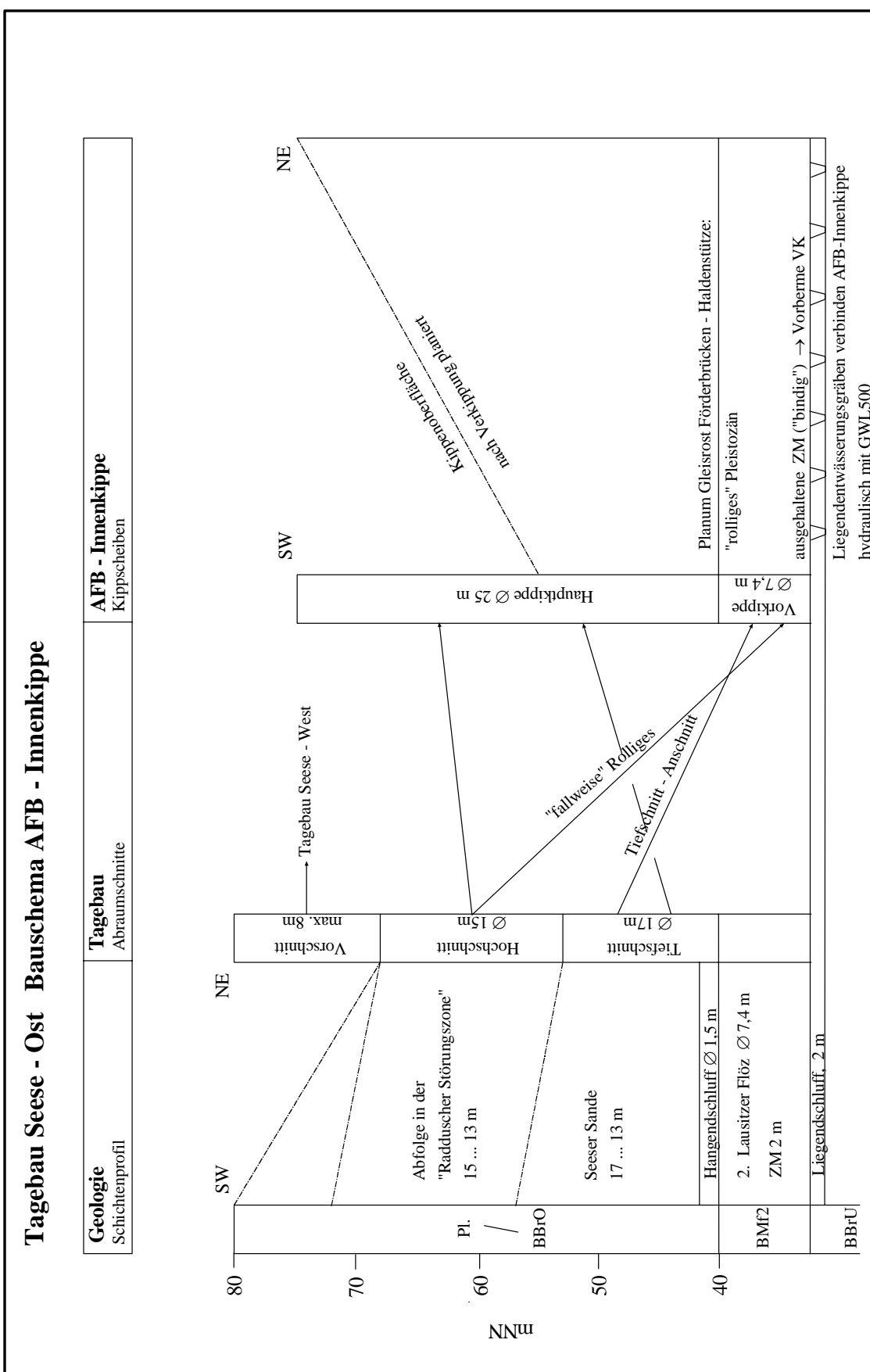


Abbildung 4-3 Geologisches Schichtenprofil – Abraumschnitte – Bauschema der AFB-Innenkippe Seese-Ost.

4.2 AFB-Innenkippe Tagebau Meuro (Teilfeld Großräschen)

Das Kohlefeld Meuro umfaßt aus geomorphologischer und regionalgeologischer Sicht die ehemalige „*Raunoer Hochfläche*“ und deren Randbereiche, Lorke 2000. Die *Abbaugrenzen* sowohl für die Kohle des 1. Lausitzer Flözes (Oberflöz, Altbergbau) wie auch des 2. Lausitzer Flözes sind vor allem *quartäre Rinnen*, die beide Flöze durchschneiden.

Norden: Großräschen-Freienhufener Auswaschungsrinne,

Westen: Pöbnitzrinne („Talsohle“ unterhalb 50 m NN),

Osten: Sedlitz-Bahnsdorfer Auswaschungsrinne mit Übergang zu Großräschen-Freienhufener Auswaschungsrinne.

Im Süden sind *Sicherheitspfeiler* (mit dort belassener Kohle) zum Stadtgebiet Senftenberg, zum Güterbahnhof Senftenberg und zur Bahnstrecke Senftenberg-Cottbus bemessen worden.

Die „Herausmodellierung“ der „*Raunoer Hochfläche*“ als *Tertiärhochfläche* erfolgte wie die Anlage der *quartären Rinnen* in einer frühquartären Hebungsphase. Charakteristisch für die Niederlausitzer Tertiärhochflächen sind geringmächtige quartäre Ablagerungen als Erosionsreste. Dies, zusammen mit der oberflächennahen Lage des 1. Lausitzer Flözes ermöglichte frühzeitig den Bergbau auf dieses *Oberflöz*. Entsprechend der Verbreitung des *1. Lausitzer Flözes* über die gesamte Raunoer Hochfläche, wurde diese Fläche durch den Oberflözbergbau (um 1870–1935) vollständig in Anspruch genommen und Altkippen, tlw. verfüllte Restlöcher und Restpfeiler von anstehender „*Raunoer Folge*“ hinterlassen, Abbildung 4-4.

Das abzugrabende Deckgebirge im Tagebau Meuro, Teilfeld Großräschen (1988-1999) mit Vorschnitt- und Abraumförderbrückenbetrieb (AFB) ist überwiegend die Schichtenfolge des Tertiär mit *marinen* Sedimenten der *Oberen Briesker Folge* und der großenteils *terrestrisch* entstandenen *Raunoer Folge*. Letztere vorwiegend als Hinterlassenschaft des Altbergbaus auf das 1. Lausitzer Flöz.

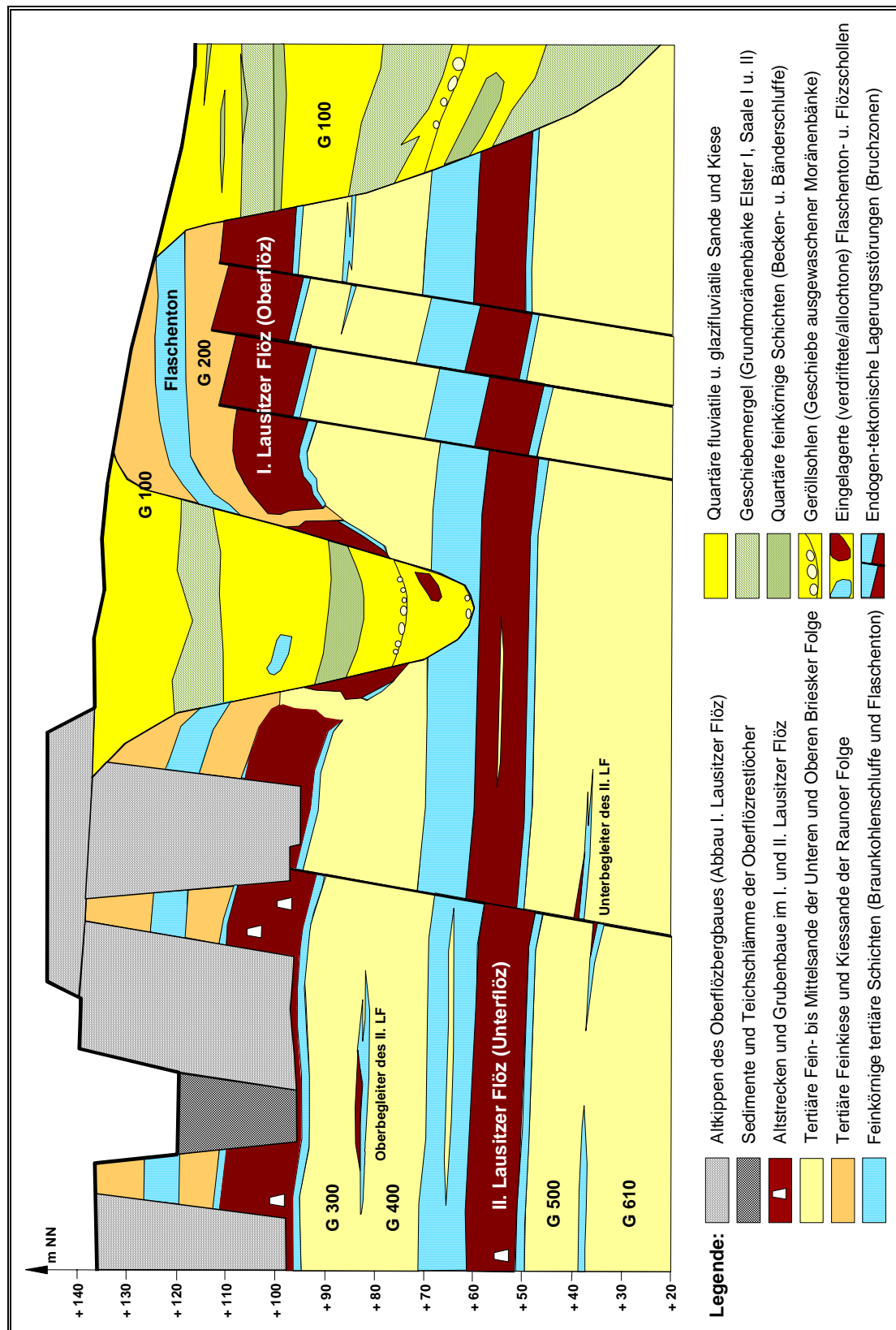
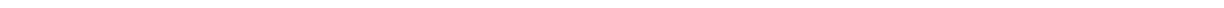


Abbildung 4-4 Normalprofil Tagebau Meuro mit Darstellung der „Hinterlassenschaften des Oberflözbergbaues“ und Pleistozänen Auswaschungsrinnen innerhalb und randlich des Kohlefeldes. Die Rinnen zeigen Abbiegung der Schichtenfolge zur Rinnenachse, eingelagerte Schollen und Steinfall. Prinzipskizze, Stratigraphische Bezeichnungen in der Legende, Lorke 2000.

Briesker Folge (BBrU und BBrO) - Der helle, tonige Liegend Schluff (0,5 m) – Rest des „lowstand system tracts“ - weist mit Merkmalen der Oxidation und Durchwurzelung auf Bodenbildung. Das 2. Lausitzer Flöz – beginnender „transgressive system tract“ -, 10-11 m mächtig wird von wiederum 10-11 m mächtigem Hangendschluff (dunkel, geschichtet) überlagert. Lorke 2000 zufolge sind dies Wattablagerungen und setzen die mit den Liegend schluffen einsetzende transgressive Entwicklung fort. Durchschnittlich bestehen die Hangendschluffsedimente zu 57 % aus Fraktion < 0,063 mm, im übrigen sind sie aus Feinsand zusammengesetzt. Die mit dieser Arbeit untersuchte Abraummischung der AFB-Innenkippe Meuro zeigt derart hohe Feinkornanteile nicht, da die im Tiefschnitt abgegrabenen Hangendschluffe zusammen mit grobkörnigeren Massen in die Hauptschüttung gelangten, vgl. Bauschema. Die den Hangendschluffen auflagernden GWL400 und GWL300 Sande (mit eingelagerten Schluffen) stellen in sequenzstratigraphischer Einordnung Ablagerungen der „maximum flooding surface“ dar. Das Verbreitungsgebiet des Oberbegleiters liegt im Südosten außerhalb des Tagebaus Meuro. Die marinen Sande des GWL300 sind sequenzstratigraphisch als „highstand system tract“ einzustufen.

Raunoer Folge (BRa) – Die Schichtenfolge, im unteren Teil vergleichbar der beim 2. Lausitzer Flöz setzt ein mit dem *Liegend schluff*. Darauf ist das 1. *Lausitzer Flöz* entwickelt mit geringmächtigem *Hangendschluff*. Es folgen *Kiessandhorizonte (GWL200)* mit einem eingeschlossenen mächtigen „bindigen“ Schichtglied, dem „Flaschenton“. Nach Lorke 2000 entsprechen die im Hangenden des 1. Lausitzer Flözes abgelagerten Sedimente einem „highstand system track“ und wurden im Rückstaubereich eines Alluvialfächers sedimentiert. Der Flaschenton entspricht dabei *Überflutungsebenenablagerungen* und die Kiessandhorizonte stellen die *Rinnenfazies* des Fächers dar.

Quartär – Lediglich im Nordosten der untersuchten AFB-Innenkippe Teilfeld Großräschen, in dem kein Vorschnitt erfolgte, wurde für die Gewinnung des 2. LF Deckgebirge aus quartärem Sediment im Brückenhochschnitt erfaßt und in die AFB-Innenkippe verkippt, Untersuchungsbohrungen MT13 und MT15. Anlagenheft „Lageplan Untersuchungsbohrungen – AFB-Innenkippe Tagebau Meuro“. Die W-E verlaufende quartäre Auswaschungsrinne „Anna Mathilde“ ragt vom Randschlauch Sedlitz (E) bis in das Abbaufeld hinein. Durch Auswaschung entstand Massenschwund, das Oberflöz fällt zur Rinnenachse hin ein und die unteren Teufenabschnitte dieses Flözes reichen bis auf den Hangendschluff des 2. Lausitzer Flözes, Abb. 4-4. Konsequenz der Rinneneintiefung sind *verminderter Hangendschluffanteil* im Abraum sowie im AFB-Tiefschnitt erfaßte Restkohle des Oberflözes, Untersuchungsbohrung MT8.



Schnittbereiche bei der Abraumgewinnung – Abgesehen von dem Bereich ohne Vorschnittbetrieb im Nordosten Teilfeld Großbräschen, wurden im wesentlichen die Hinterlassenschaft des Altbergbaus im *Vorschnittbetrieb* gewonnen und in andere Teilfelder Tagebau Meuro verkippt. Die in Restpfeilern anstehenden und gewinnbaren Restvorräte des Oberflözes wie auch der Flaschenton wurden *selektiv gewonnen*.

Der Hangendschluff des Oberflözes und der Flaschenton als hauptsächliche „bindige“ Schichtglieder bilden ~ 25 % des Deckgebirges des 1. Lausitzer Flözes. Das entspricht nach Lorke 2000 in etwa dem Anteil feinkörniger Sedimente in den Altkippen, die tiefer langten als mit dem Vorschnitt erreichbar und somit durch den Brücken-Hochschnitt gewonnen und in die AFB-Innenkippe geschüttet wurden.

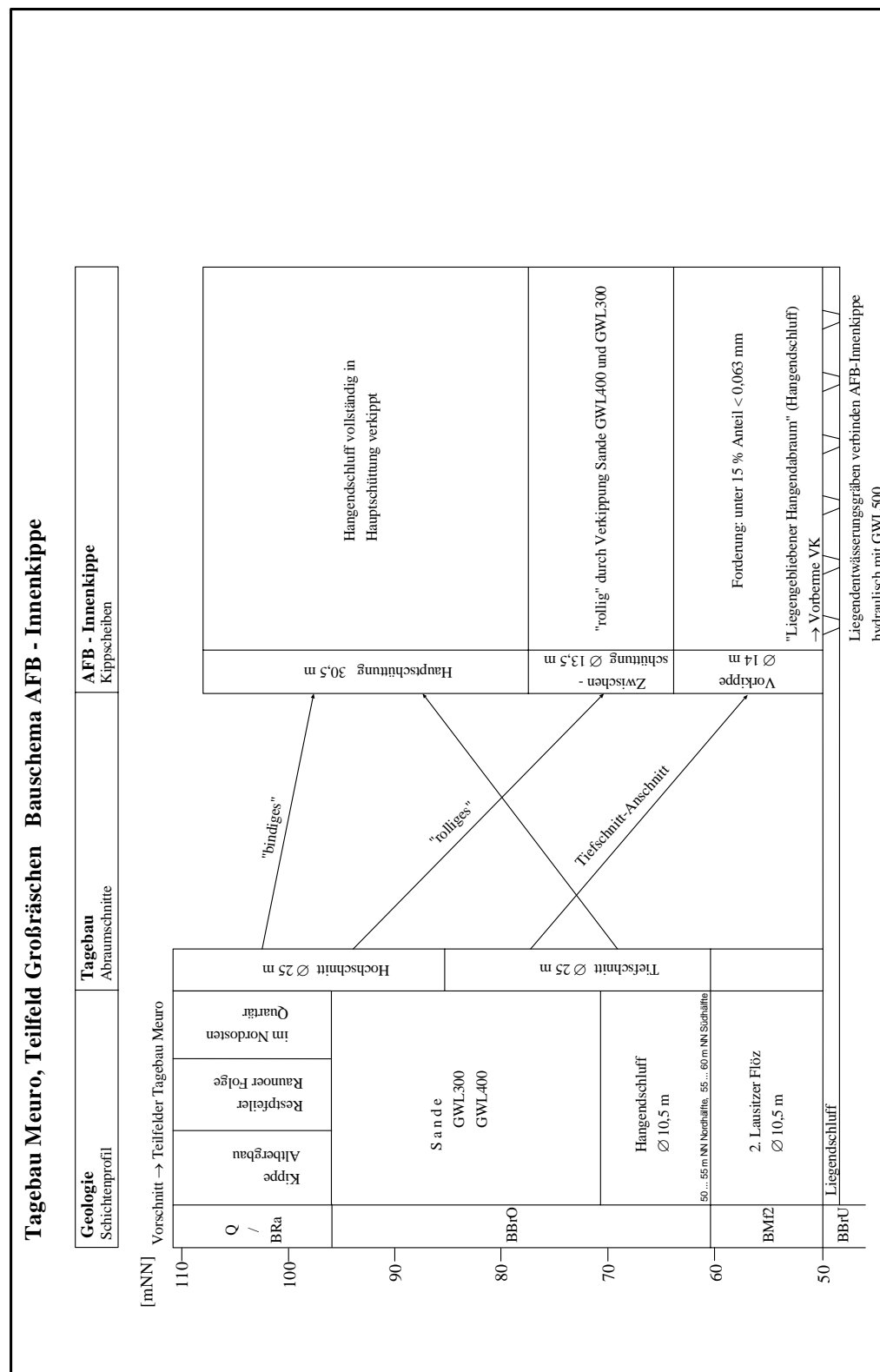


Abbildung 4-5 Geologisches Schichtenprofil – Abraumschnitte – Bauschema der AFB-Innenkippe Meuro, Teilfeld Großräschen.

5 Gefügeeigenschaften der Abraumschüttungskörper

Teil der Kennzeichnung der Kippenmassive nach *Schüttungslagerung*, *Schüttungsgefüge* und *Stoff* hinsichtlich der Konsequenzen beim Grundwasserwiederanstieg.

- *Schüttungslagerung* – beschreibt die *räumliche Anordnung* der aus Deckgebirgsmischung geschütteten Rippen. Die Lagerung kommt z.B. in der Verteilung der Merkmale des Schüttungsgefüges wie der charakteristischen, in Abbaurichtung geneigten Wechschelichtung nach Korngröße und Material zum Ausdruck. Die räumliche Betrachtung orientiert sich dabei nach den *Richtungen* der Kippenkörper-Entwicklung 1.) zur Rasensohle (Aufwachsen Schüttungskegel), 2.) in Strossenrichtung vom Drehpunkt zum Schwenkende, 3.) Aufschwenkrichtung.
- *Schüttungsgefüge* – beschreibt den Kornverband im Schüttungskörper AFB-Innenkippe, charakterisiert durch die Merkmale der *Korngrößenverteilung* und der *Hohlräume* (Porenvolumen). Entsprechend der Entstehung durch die kontinuierlich bewegte Schüttungsvorrichtung Abraumförderbrücke mit dabei auftretender *Fallrichtung* und *Rippenstreichrichtung* steht das Schüttungsgefüge in Bezug zu den Richtungsmerkmalen der Schüttungslagerung.
- *Stoff* – Reaktionswichtige Parameter der mineralogisch-chemischen Zusammensetzung der Abraumsedimentmischung.

5.1 Auswirkungen des Schüttungsgefüges in den AFB-Innenkippen auf bodenmechanische Eigenschaften und Vorgänge beim Wiederaufgehen des Grundwassers

Die Gefügeeigenschaften der lockeren Deckgebirge-Abraumschüttung führen im Zusammenhang mit dem Grundwasserwiederanstieg zu *Effekten* hydraulischer (I.) und bodenmechanischer (II.) Natur.

- I. Einfluß auf die *Durchlässigkeitseigenschaften*: Niederschlagsversickerung - Wasserbewegung in den Kippenmassiven — Kippenwasserspiegelhöhe – AFB-Innenkippe als künftiger Leiter für den Grundwasserdurchstrom.
 - II. Einfluß auf den *bodenmechanischen Zustand*: z.B. Standsicherheit von Kippenböschungen bei ansteigendem Grundwasser und damit verbundene Gefahr von Setzungsfließen, Setzung und Sackung. Die Verformung des porösen Mediums der AFB-Innenkippe *wirkt zurück* auf dessen Durchlässigkeit und z.B. den Flurabstand des künftigen Grundwasserspiegels.
-

Nachstehend werden die *bodenmechanischen Vorgänge* beim Grundwasseranstieg anhand Definitionen in Hallbauer 1981, Förster et al. 1989 und anderen erläutert. Zu den Durchlässigkeitseigenschaften erfolgt dies im Abschnitt „5.4 Hydraulische Leitfähigkeit“.

Eigensetzung - Folge einer vertikalen, reversiblen (z.B. „Liegendwiederzusammendrückung“) oder irreversiblen Zusammendrückung eines Lockergesteinskörpers (natürlich gelagert, geschüttet/verkippt) durch die *Eigenlast* der Lockergesteine. Für Kippeninnenflächen Tagebau Welzow-Süd beträgt die relative Gesamtverformung $1,0 \pm 0,2 \%$, der Setzungszeitwert beträgt 98 ± 25 Monate, Hallbauer 1981.

Lastsetzung - Folge einer vertikalen, irreversiblen Zusammendrückung eines Lockergesteinskörpers (natürlich gelagert, geschüttet/verkippt) unter *statischer* und/oder *dynamischer* Lasteinwirkung durch ein Bauwerk und dessen Nutzung.

Setzung - umfaßt die mit *Eigensetzung* und *Lastsetzung* beschriebenen Sachverhalte.

Sackung - Folge einer irreversiblen, z.T. schlagartig auftretenden Verformung eines Lockergesteinskörpers (Gefügezusammenbruch) infolge plötzlicher *Veränderungen* der hydrologischen Verhältnisse (z.B. plötzliche *Grundwasser-Spiegelschwankungen*). Nach Kezdi 1964 ist *Sackung* der Setzungsanteil durch Kornumlagerung infolge erstmaliger Wassersättigung. Prinz 1997 zufolge ist *Sackung* die Sättigungssetzung durch Umlagerung des Korngerüsts.

Senkung - vertikaler Anteil einer Verschiebung an der Erdoberfläche infolge natürlicher (z.B. Auslaugungs-) oder künstlicher (z.B. bergmännischer) Hohlraumbildung „im Bauraum oder Untergrund“.

Gefahren im Bereich der Restlochseeböschungen und Innenkippenflächen rufen v.a. 1.) *Setzungsfließen*, 2.) *Setzung - Sackung*, sowie 3.) *innere Erosion* hervor, Förster et al. 1989.

1.) Setzungsfließen – Verflüssigung wassergesättigter Sande

Bei bindigen Sedimenten spricht man von *Fließbrutschungen*. Ursache ist die Tendenz *locker* gelagerter Sedimente zur *Verdichtung* und dessen Behinderung aufgrund des porenraumfüllenden Wassers, Gefügezusammenbruch als Ausweichreaktion. Tritt als Oberflächenverformung, *initiiert* durch Setzung und Sackung, an *Böschungen*, aber auch in *Innenbereichen* der Kippen sowie durch strömendes Grundwasser auf. Um in den Kippen-Innenflächen Initial gebende Sackungen zu vermeiden, ist für den Grundwasserspiegel ein Flurabstand > 3 m einzuhalten, Thiemi (mdl. Mittlg.) 2002. Die Vorgänge finden i.d.R. vor

der durch den Grundwasserwiederanstieg erreichten *Konsolidierung* statt. Größere Setzungsfließ-Ereignisse traten bisher bei Tagebau-Restlochseen (Kippenböschungen) auf, bei denen Luckner 1997 zufolge

- nicht fremdgeflutet wurde, nur „natürlicher“ Grundwasserwiederanstieg,
- der Endwasserspiegel noch nicht erreicht war,
- die Böschungen von der Kippenseite durch das Grundwasser angeströmt wurden.

Die Setzungsfließgefahr wird anhand von *Parametern des Schüttungsgefüges* und weiterer Merkmale beurteilt:

Korngrößenverteilung / Partikeleigenschaften

- Kornverteilungskurve des zu beurteilenden Sediments innerhalb Grenzband setzungsfließgefährdeter Bereich. vgl. Abb. 1 Stock 1989, Abb. 7 Förster et al. 1989 mit Ausweisung Vorkippen- und Hauptkippenschüttung.
- $U < 3$, gefährdet sind engklassierte Sande, „Schwimmsande“.
- bei Feinkornanteil $> 25\%$ und/oder Kieskornanteil $> 30\%$ keine Verflüssigungsgefahr.
- „linsenförmige Einlagerung feinkörnigen Kippguts in AFB-Hauptkippe mit überwiegend sandigem Aufbau hat auf deren Verflüssigungsneigung keinen mindernden Einfluß“.
- Kornform, -Oberflächenrauigkeit

Lagerung - Lagerungsdichte

Verflüssigungsgefahr bei *lockerer bis mitteldichter Lagerung*. *Vorkippe*, Kippenteil mit relativ höherer Lagerungsdichte infolge max. möglicher *Eigenlast* im Kippenmassiv als *fest/tragfähig* einzustufen. Die häufig in diesen Kippenteil geschütteten engklassierten Sande oder Kiese, nach Kriterium $U < 3$ *verflüssigungsanfällig* und beim Tagebaubetrieb strikt trocken zu halten, können aufgrund ihrer Korngrößenverteilung ein relativ großes Hohlraumvolumen aufweisen, der besonders bei geringen Partikeldurchmessern nur schwer reduziert (verdichtet) werden kann. Die *geringe Rohdichte* (hohe Porosität) bei erreichter *großer Lagerungsdichte* zeigt die Unabhängigkeit der beiden Eigenschaften voneinander. Eckige Kornformen setzen die Anfälligkeit zur Verflüssigung herab.

Wasserstandsentwicklung

Reichel 1997 zur Bedeutung der Geschwindigkeit des Grundwasseranstiegs auf das *Sackungsmaß*, siehe unter 2.) *Setzung – Sackung*. Abhängig von der Geschwindigkeit des

Grundwasserwiederanstiegs wird der v.a. in bindigen Bereichen der Kippe entstehende *Porenwasserüberdruck* unter Umständen nicht abgebaut. Dadurch ist ein Gefügezusammenbruch (Sackung) mit Wirkung in die auflagernde Schüttung wahrscheinlich.

2.) **Setzung - Sackung**

Die *Eigensetzung* der Kippen vor dem Grundwasseranstieg führt nicht zur – abhängig vom Ungleichförmigkeitsgrad - theoretisch möglichen dichtesten Lagerung der Schüttung, Hallbauer 1981. Die Abraumschüttungsmassen weisen vor dem Grundwasseranstieg nur den als „Bergfeuchte“ bezeichneten geringen Wassersättigungsgrad auf. Als Porenwinkelwasser sammelt sich dies in den Berührungspunkten der Körner. Die resultierenden Haftkräfte (*Kohäsion*) zwischen den Körnern verhindern, daß sich in diesem Zustand der Abraumischung eine dichte Lagerung ausbildet.

Beim Grundwasserwiederanstieg kommt es zur *Änderung des Spannungszustands* im Kornverband, die Kohäsion verringert sich bzw. wird aufgehoben. Durch Bewegung im Korngerüst wird eine dichtere Lagerung erreicht. Diese Vorgänge finden unmittelbar im Bereich des ansteigenden Wasserspiegels statt, Hallbauer 1981.

Nach Durchstreichen der Wasserfront nur noch vernachlässigbar kleine Vertikalverformungen finden Fuchs & Schüler 1997, Wichter & Kügler 2000. Der *gesamte Sackungsbetrag* erfolgt bereits beim „ersten Durchgang“ des aufgehenden Wasserspiegels vollständig und bei künftig schwankendem Grundwasserspiegel findet Setzung und Setzungsfließen nicht mehr statt. Die *Verfestigung des Korngerüsts* über Kohäsionskräfte hinaus durch Phasenkontakte wird durch das aufgehende Grundwasser wieder aufgehoben, Wichter & Kügler 2000. Hinsichtlich geeigneter Maßnahmen des *Sanierungsbergbaus* sind somit Inseln in Restlochseen zu vermeiden, da sie nicht in ausreichender Höhe vom Grundwasserspiegel erreicht werden, der erst die *konsolidierende Sackung* verursacht.

Reichel 1997 beschreibt die Abhängigkeit des relativen volumenbezogenen *Sackungsmasses* von der Geschwindigkeit des Grundwasserwiederanstiegs in Kippen als Ergebnis der *Kornumlagerung* in dem durch Unterdruck (Kapillarspannung) gekennzeichneten *Kapillarsaum*. Dieser eilt der eigentlichen Front des wiederansteigenden Grundwassers voraus. Die Höhe des Kapillarsaums steigt mit sinkender Wasseranstiegsgeschwindigkeit, so daß *geringe Wasseranstiegsgeschwindigkeiten* für vollständige Setzung am wirkungsvollsten sind.

Höhe des Kapillarsaums in Lockergesteinen, Prinz 1997

Sand und Kies	20-100 cm	kf=10-3 ... 10-4
Fein-, Mittelsand	100-150 cm	kf=10-5 ... 10-6
Lehm, Löß	- 350 cm	kf=10-7 ... 10-9

Ab einer bestimmten Wasseranstiegsgeschwindigkeit wird kein Kapillarsaum ausgebildet.

Durch das für die Schüttungskörper der AFB-Innenkippen typische Nebeneinander petrographisch unterschiedlich zusammengesetzter Schüttungsrippen oder Schüttungsschichten mit verschiedener Kapillarspannung zeigt die Oberfläche des ansteigenden Grundwassers *wellenförmigen Verlauf* und es sind in +- regelmäßigen Abständen in Abbaurichtung unterschiedliche Setzungsbeträge zu erwarten. Zudem werden bindige Lockergesteinslagen durch Konsistenzänderung infolge Aufsättigung durch aufsteigendes Grundwasser ein spezifisches Eigensetzungsverhalten zeigen.

Ein möglicher Setzungsbetrag *vor* Einwirken des Grundwasserspiegelanstiegs rührt von der lokalen Infiltration von Oberflächenwasser, was zur Forderung nach frühzeitigem Begrünen der geplanten Kippenoberfläche zur *Erhöhung des Versickerungsanteils* der Niederschläge für einen *gleichmäßigen Setzungsverlauf* im oberen Kippenteil führen soll.

Die Ursache der Setzung im Gewachsenen der *Tagebauumgebung* durch deren Entwässerung liegt im vorbergbaulich *flurnahen Grundwasser-Spiegel*. Durch irreversible Setzungsbeträge bis 1 %, entsprechend z.B. 50 cm sind *Vernässungen* eine typische Folgeerscheinung.

3.) Innere Erosion

Diese Gruppe hydromechanischer Verformungen von Lockergesteinen ist z.B. als *Initial* für Sackung und Setzungsfließen wirksam. Vergleichbar den Umständen, welche die Filterdurchlässigkeit beeinflussen, begünstigen in den Kippenmassiven die *lockere Lagerung* mit „Makroporen“ (Reichel 1999) und Verteilung des Feinkorns das Auftreten von *innerer Erosion und – Suffosion*. Innerhalb der Kippscheiben begünstigt die rollig-bindig-Wechselagerung mit unterschiedlicher Durchlässigkeit durch die zahlreichen Kontakte Grobkornlage / Feinkornlage das Auftreten von *Kontakterosion und –Suffosion*. *Feststofffracht im Kippendurchstromwasser* weist auf derartige Vorgänge, z.B. Zakosek & Zepp 1988.

- Innere Erosion: Ausspülung von Feinkorn
 - Innere Suffosion: Ausspülung von Feinkorn ohne Strukturänderung
 - Kontaktsuffosion bzw. –Erosion: Teilchen des feinkörnigen Lockergesteins wandern in die Poren des gröberen Lockergesteins.
-

- Kolmation: Umkehr der Suffosion; Ablagerung von mit dem Grundwasserstrom transportierten Teilchen, rückschreitender Prozeß.

Erosionsfördernde Merkmale im Bau der Kippen

- „Nahtstellen“ der Schüttungen: Streichrichtung der Rippen zu GW-Anstromrichtung
- horizontale und geneigte *Schichtgrenzen*: Kippscheiben, Schüttungsrippen, darin Schüttungsschichten, „Kontaktzone“ der Schüttung aus zwei Drehpunktbereichen, Fuchs & Schüler 1997 am Beispiel der AFB-Innenkippe Niemtsch (Senftenberger See).
- *Kontraste* von Durchlässigkeit und Feinkornanteil entlang Anstiegs-, Anstrombahnen des Grundwassers. Z.B. gut durchlässige Vorkippe, gering durchlässige Hauptkippe.

5.2 Korngrößenverteilung

Die *Korngrößenverteilung* ist grundlegendes Merkmal des Schüttungsgefüges und wirkt auf Eigenschaften der Abraummischung, die für die Vorgänge beim Grundwasserwiederanstieg maßgeblich sind. *Porosität* und *Durchlässigkeit* z.B. sind Ausdruck des Korngerüsts (Packung je nach Korngrößenverteilung) und des durchflußbestimmenden Feinkornanteils. Die Porosität der locker geschütteten Abraummischung wird durch die Korngefügeeinregelung des aufgehenden Grundwassers herabgesetzt.

Diese Eigenschaften und ihre Veränderung in den verschiedenen Teilen der Kippenkörper werden zur Beurteilung des *bodenmechanischen Verhaltens* der Abraumschüttung, wie des Sackungspotentials sowie der *Wegsamkeit* für den Transport von Lösungen, welche aus stofflichen Umsetzungen resultieren, benötigt.

Aufgrund des Zusammenhangs zwischen *Feinfraktionsanteil* und natürlicher Radioaktivität (GR-Log) erfolgt die Kalibration der Bohrlochmessungen für die Angabe von Feinfraktionsanteilen in den *Spülbohrungen*, Abschnitt 5.3.1.1. Damit können *stoffliche Eigenschaften* der Abraummischung sowie der *Durchlässigkeitsbeiwert k_f* für Spülbohrungen ermittelt werden. Der Korngrößenparameter „Feinfraktionsanteil“ und seine räumliche Veränderung im Kippenkörper wird ausführlich erläutert.

Für den in der Praxis der Bohrlochmessungen bisher wenig bearbeiteten Fall *technische Schüttung* ist über die Wirkung der *Korngrößenverteilung* auf die im Bohrloch bestimmte *Dichte der Schüttung* wenig bekannt. Anhand Korngrößenmedian M_d und Ungleichförmigkeitsgrad U wird der Einfluß der Korngrößenverteilung auf die im Bohrloch gemessene Dichte der Abraumschüttung untersucht.

5.2.1 Korngrößensummenkurven der Abraumschüttungen

(Anlagenband S1.1, M1.1). Grundschemata für die Anordnung der Kornsummenkurven ist das 5 m-Intervall der aus 1 m-Proben hergestellten Mischproben. Regelmäßig sind je 3 Kornsummenkurven, entsprechend 15 m Abraumschüttungsfolge mit durchgezogener Linie in einem Diagramm dargestellt.

Für die Abraumschüttungsfolge *Seese-Ost* sind von jeder Trockenkernbohrung zusätzlich die Kornsummenkurven der obersten zwei 1 m-Proben wiedergegeben. Die Kornsummenkurven im Basisbereich der Abraumschüttungen, die zum Teil Liegendsedimente miteinfassen, sind mit Punkt-Liniensignatur dargestellt.

5.2.2 Korngrößencharakteristik der Abraumschüttungen

Seese-Ost - Die Abraummischung der Innenkippe Seese-Ost besteht aus *Fein- bis Mittelsanden*. Der Korngrößenmedian variiert in weiten Grenzen zwischen 0,11 und 0,73 mm. Die Mittelsande sind ungleichförmig ($U = 5$ bis 15) bis sehr ungleichförmig ($U > 15$) und enthalten zwischen 4 und 25, im Mittel 12 Gew.-% Feinkornanteil (Fraktion < 0.063 mm). Die *Feinsande*, dominierend vertreten in den Abraumsedimenten, Bereich *Bohrungen ST8 und ST15* sind überwiegend gleichförmig ($U < 5$) und haben geringe Feinkornanteile zwischen 3 und 6, im Mittel 4 Gew.-%. Für Fein- und Mittelsande variiert der Anteil der Fraktion > 2 mm in weiten Grenzen von 2 bis 20 und beträgt im Mittel 8,5 Gew.-%.

Meuro - *Feinsande* (Mediankorndurchmesser bis 0,2 mm) überwiegen in der untersuchten Abraumschüttungsmischung Meuro. Die häufig hohen Anteile Fraktion 0,063 mm bis 0,2 mm führen im Vergleich zu den Kornsummenkurven Seese-Ost zunächst zur Einschätzung eines besser korngrößensortierten Sediments.

Die Errechnung des Ungleichförmigkeitsgrads (d_{10} sehr niedrig) ergibt jedoch überwiegend die Zuordnung in ungleichförmige Körnung. Die Feinkornanteile liegen zwischen 6 und 25, im Mittel 13 %. Grobkorn ($> 2,0$ mm) reicht von 0,4 bis 21, im Mittel 5 Gew.-%.

5.2.3 Mediankorndurchmesser M_d [mm]

Die mediane Korngröße M_d - bei 50 % der Kornsummenkurve – eines klastischen Sediments ist *Kennwert für dessen Korngröße*. Wegen seiner Unempfindlichkeit gegenüber Änderungen der Korngrößenverteilung an den Enden ist er zur Kennzeichnung eines Sediments der Angabe der mittleren Korngröße vorzuziehen.

Bei der Schüttung von Lockergesteinspartikeln beeinflusst die Korngröße deren Lagerung wesentlich mit. Feinkörnige Gesteine sind in der Regel lockerer gelagert als grobkörnige Gesteine. Wie die Ungleichförmigkeitszahl ist die Angabe des Medianwertes nur auf der Basis einer vollständigen Korngrößenanalyse möglich.

Einteilungsgrundlage für die Veränderung des Medians in den Schüttungsfolgen ist die Grenze 0,2 mm zwischen *Feinsand* und *Mittelsand*. Mit 0,15 mm als Obergrenze wurden die *feinstkörnigen* Abraumschüttungsmassen abgegrenzt.

Seese-Ost - Die Mediankorndurchmesser zeigen im unteren Kippenbereich ein weites Wertespektrum von 0,11 bis 0,73 mm (Anlagenband S1.1), das sich im Teufenbereich 45 bis 50 m NN auf 0,21 bis 0,338 verengt. Die *Geschiebemergel* setzen den Korngrößenmedian deutlich herab, Bohrungen ST7 und ST10 oberer Teil. Die insgesamt feinkörnige Abraumschüttung, Bohrung ST8 besteht aus einem *feinkörnigen Kippenunterteil* mit ~ 0,150 bis 0,180 mm und einem *gröberen Kippenoberteil* (25 m) mit 0,199 bis 0,220 mm Mediankorndurchmesser.

Meuro - Die gesamte, mit der MT5 und der MT10 erbohrte Abraumschüttungsfolge besteht aus *sehr feinkörnigem Sediment* mit $Md < 0,15$ mm (Anlagenband M1.1). Diese Feinkörnigkeit wird außerdem in bis 10 m mächtigen Abschnitten der MT1, MT8, MT13 und MT15 erreicht. *Feinsand* (Mediankorndurchmesser bis 0,2 mm) dominiert in der Abraumschüttung, Bohrung MT1 und tritt in mehreren Kippenabschnitten MT8, und dem oberen Kippenabschnitt der MT13 und der MT15 auf.

Mittelsand ist das vorherrschende Sediment über mehrere 10 m der Kippenunterteile MT13 und MT15. Zwar werden im unteren Schüttungsabschnitt MT13 mit Geschiebemergel damit vergleichbare Medianwerte wie in Seese-Ost erreicht; jedoch gehen in der MT13 wegen der auflagernden feinkörnigen Hangendschluffe die Mediankorngrößen in der Schüttung deutlich zurück.

5.2.4 Ungleichförmigkeitszahl U [-]

Die Ungleichförmigkeitszahl $U = d_{60}/d_{10}$ kennzeichnet als Maßzahl für die Neigung der Kornsummenkurve die Gleichförmigkeit der Korngrößenverteilung, die in der Sedimentologie als Korngrößensortierungsgrad bezeichnete Sedimenteigenschaft. Gebräuchlich ist die Einteilung in gleichförmige, sortierte ($U < 5$), ungleichförmige, unsortierte ($U = 5 \dots 15$) und sehr ungleichförmige, extrem unsortierte Sedimente ($U > 15$).

Diese Sedimentkenngröße wird zum einen für die Beurteilung der *Setzungsfließgefährdung* der Abraumschüttung beim Grundwasserwideranstieg herangezogen. Bei der Frage nach der *Verdichtbarkeit* eines Lockersediments steht für die hier untersuchten derzeit trockenen Abraumschüttungskörper die Setzung infolge Gefügeänderung (dichtere Kornpackung) beim Grundwasseranstieg im Vordergrund. Anhaltswerte hierfür können aus der *Ungleichförmigkeit* der Abraumsedimentmischung zusammen mit deren *Porosität* gewonnen werden. Bei hoher Anfangsporosität werden *ungleichförmige* Abraumsedimentmischungen die größten Gefügeänderungen (Setzung, Sackung) erfahren.

Gleichförmige Sedimente zeigen nicht das für die lockeren Ablagerungen charakteristisch hohe Setzungsmaß. Für diese Sedimente wie die Vorkippenschüttung bleibt unter Belastung bzw. dem Einfluß der aufsteigenden Kapillarfront des ansteigenden Grundwassers die Packungsdichte weitgehend unverändert. Die maximal dichte Lagerung ist von vornherein erreicht. Mit steigender Ungleichförmigkeitszahl nehmen die Unterschiede in dem sich unter Belastung bzw. Grundwasserwideranstieg einstellenden Gefüge, abhängig vom Anfangsporenanteil zu, Reichel 1999.

Seese-Ost - Die Abraumschüttung AFB-Innenkippe Seese-Ost variiert zwischen *gleichförmig* bis *sehr ungleichförmig* (Anlagenband S1.1). Der überwiegende Teil der Schüttung mit Werten von U zwischen 5 und 15 ist *ungleichförmig*. In keinem Fall erreicht die Ungleichförmigkeitszahl Werte < 3 , ein Kriterium der Setzungsfließgefährdung.

Ein korngrößenmäßig besser sortierter Kippenunterteil wird von einem Kippenoberteil geringer sortierter Abraummischung überlagert. Bei der feinkörnigen Schüttung im Bereich der ST8 und ST15 variiert U im gesamten Vertikalprofil lediglich zwischen 3 und 4. ST15 zeigt wie die ST3 und ST10 wiederum besser sortierte Schüttung in den obersten 10 m der Kippe. Die Abraummischungen, Bohrungen ST7 und ST10 mit im oberen Vertikalabschnitt verkipptem *Geschiebemergel* zeigen die höchsten festgestellten Ungleichförmigkeitszahlen, 42 ... 52.

Meuro - Die Abraumsedimentmischung Meuro zeigt überwiegend *ungleichförmige* Korngrößenverteilungen (Anlagenband M1.1). Größere zusammenhängende Abschnitte der Abraumschüttungsfolge mit gleichförmigem Korngrößengemisch liegen bei der MT1 und im unteren Kippenteil im Bereich der MT10 vor. Mit U-Werten < 3 besteht für diese Sedimente wie außerdem um 86 m NN, MT1 eine *Setzungsfließgefährdung*.

Ein mächtiger Abschnitt mit *sehr ungleichförmiger* Abraumsedimentmischung bildet den unteren Teil der Bohrung MT13, in dem Geschiebemergel geschüttet wurden.

5.3 Feinkornanteil (Fraktion < 0,063 mm)

Der Wert des in der Abraummischung enthaltenen *Feinkornanteils* muß zur Beurteilung der *hydraulischen, geochemischen und hydrochemischen und bodenmechanischen* Eigenschaften der Abraumschüttung und ihrer Veränderung, vor allem im Zuge des Grundwasserwiederanstiegs bekannt sein.

Feinkörnige Bestandteile beeinflussen durch ihre Adsorptionshülle aus Wasser die Wasserbewegung im Porenraum. Für die Abschätzung des *Durchstromverhaltens* und der Fließwege des den Kippenkörper künftig durchströmenden lateralen Grundwasser-Stroms, sind Werte des Durchlässigkeitsbeiwertes k_f notwendig. Kaubisch & Fischer 1984a, b und 1985 wiesen mit vergleichenden Untersuchungen von Korngrößenverteilungen und Durchströmungsmessungen an Abraumschüttungen eine deutliche Korrelation zwischen k_f und dem Anteil Fraktion < 0,063 mm nach. Dieser Zusammenhang bildet die Grundlage zur Ermittlung von k_f -Werten für die Spülbohrungen.

Die Abraumschüttung aus tertiärem und quartärem Deckgebirge besteht zum einen aus quarzdominierter Sandfraktion. Die beim Grundwasserwiederanstieg *reaktionsrelevanten mineralisch-geochemischen Sedimentbestandteile* sind in der Fraktion < 0,063 mm angereichert. Dessen Anteil informiert somit in erster Näherung über die Gehalte dieser Bestandteile.

Anteil Fraktion < 0,063 mm zur Beurteilung *bodenmechanischer Eigenschaften der Schüttung und deren Änderung*: Bei Abraumschüttungsfolgen treten, abweichend von natürlichen Ablagerungen „Makroporen“ auf, Reichel 1999. Das sonst für derartige Ablagerungen kennzeichnende hohe Primärsetzungsmaß tritt bei Sedimenten mit über 20 ... 30 % Anteil Fraktion < 0,063 mm nicht ein. Hier bilden sich die Makroporen zwischen Kornagglomerationen (Brocken) aus und der Zusammenbruch dieser Makroporen hat kaum Auswirkungen auf das Korngefüge in den Kornagglomerationen.

Die *Bestimmung* des Feinkornanteils erfolgt im Rahmen der kombinierten Sieb- und Schlämmanalyse zur Ermittlung der Korngrößenverteilung, DIN 18123. Der Parameter kann außerdem mit geringem Aufwand – Schlämmen durch 0,063 mm-Sieb – ohne vollständige Korngrößenanalyse bestimmt werden.

Von Bedeutung hinsichtlich des Erkundungsmethodischen Vorgehens ist die indirekte Bestimmung des Parameters durch die Bohrlochmessung *GAMMA-Log (GR-BLM)* in den Trockenkern- und Spülbohrungen des Erkundungsprogramms.

5.3.1.1 Kalibration des GAMMA-Logs (GR-BLM) zur Anzeige des Feinkornanteils

Auf der Grundlage der Untersuchungen von Schön 1983 und Steinbrecher 1982 sowie eigenen Arbeiten über den Zusammenhang zwischen Merkmalen der Korngrößenverteilung und der GR-BLM an Sedimenten des Niederlausitzer Braunkohlenreviers kommt Kaubisch 1986 zur Schlußfolgerung, daß in der Variation der GR-BLM die Veränderung der gesamten Ton- und Schlufffraktion wiedergegeben wird. Dies zeigen auch die Untersuchungen von Zwingmann & Wein 1989.

Entsprechend den 5 m-Intervallen der Bohrkernuntersuchung wurden die GAMMA-Log-Meßwerte (im Abstand von 10 cm) dieser Teufenabschnitte über die Bildung des arithmetischen Mittels zusammengefasst. Um die Werte der natürlichen Gammastrahlung in Spülbohrungen und verrohrten Trockenkernbohrungen miteinander vergleichen zu können, ist der Verrohrungseinfluß zu berücksichtigen. Die vom Sediment ausgehende Gamma-Strahlung wird in ihrer Intensität durch das Eisen der Verrohrung reduziert. Wie in der Log-Auswertepaxis üblich, wird dieser Einfluß mit einem Faktor 1,33 auf die GAMMA-Log-Meßwerte in den vorrohrten Trockenkernbohrungen korrigiert, Petzold (mdl. Mittlg.) 2000.

Für die Abraumschüttungen Seese-Ost und Meuro wurde je eine Relation zwischen GAMMA-Log-Meßwert der Trockenkernbohrungen und Feinkornanteil aufgestellt und damit aus den GAMMA-Log-Meßwerten der Spülbohrungen der *Feinkornanteil ermittelt*.

GAMMA-Log (GR-BLM) und Feinkornanteil - Abraumschüttung Seese-Ost

Das Gesamtfeld der Wertepaare, Abb. 5-1 (A) entspricht der erwarteten Relation höherer Werte der GR-Bohrlochmessung bei höherem Feinkornanteil in der Abraummischung. Teilweise mit Überlappungen zu anderen Bohrungen, zum Teil klar abgegrenzt bestehen *Wertebereichsfelder* für einzelne Bohrungen, *entsprechend Abraumschüttungsbereichen*. Die Gruppe der Bohrungen ST3, ST7 und ST10 mit verhältnismäßig großer Bandbreite des Feinkornanteils zwischen 3,8 und 21,9 Gew.-% zeigt einen entsprechend weiten Wertebereich des GAMMA-Log-Meßwerts von 28 API bis 59 API (Einheit für die integrale Gamma-Aktivität; 16,5 API = 1 µg Radium-Äquivalent/Tonne).

Davon verschieden ist die Anordnung der Wertepaare der Bohrungen ST8 und ST15. Der relativ geringen Bandbreite der insgesamt niedrigen Feinkornanteile bis max. 6,1 Gew.-% entspricht ein kleiner Wertebereich des GAMMA-Logs zwischen 23 und 31 API.

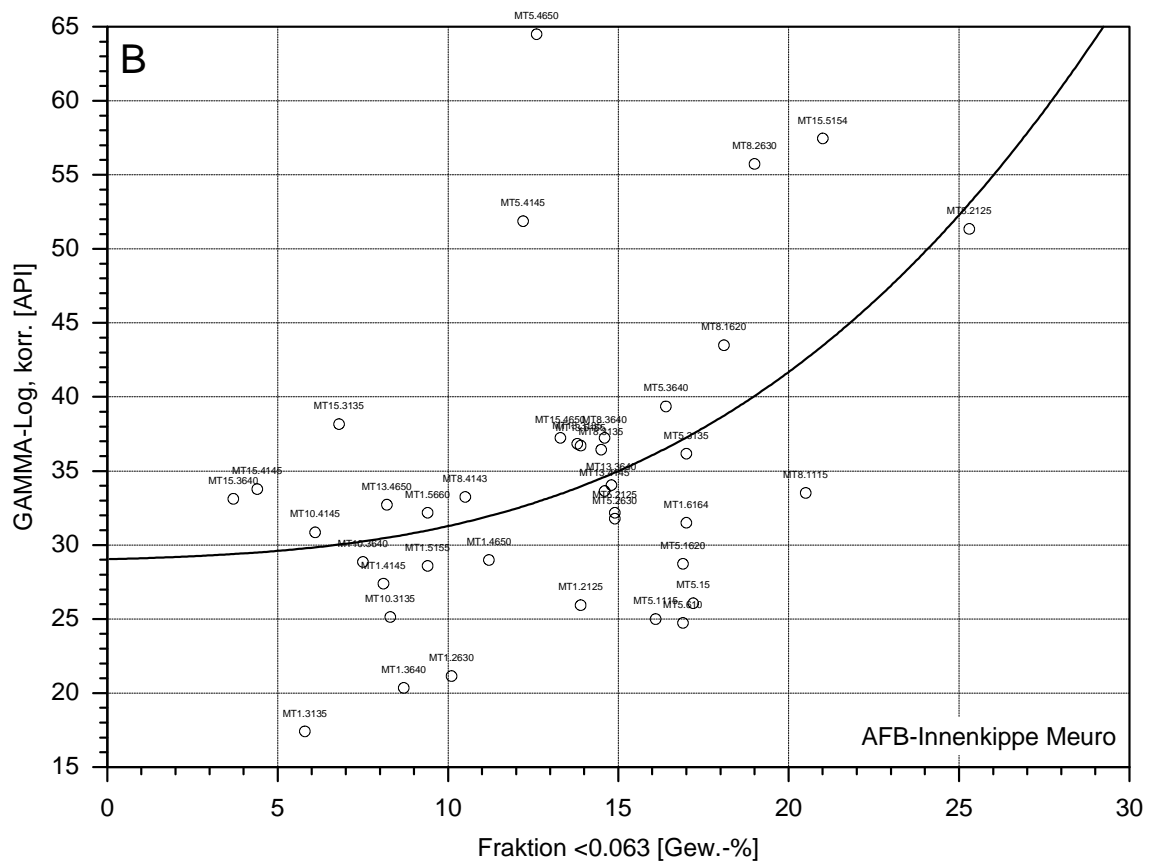
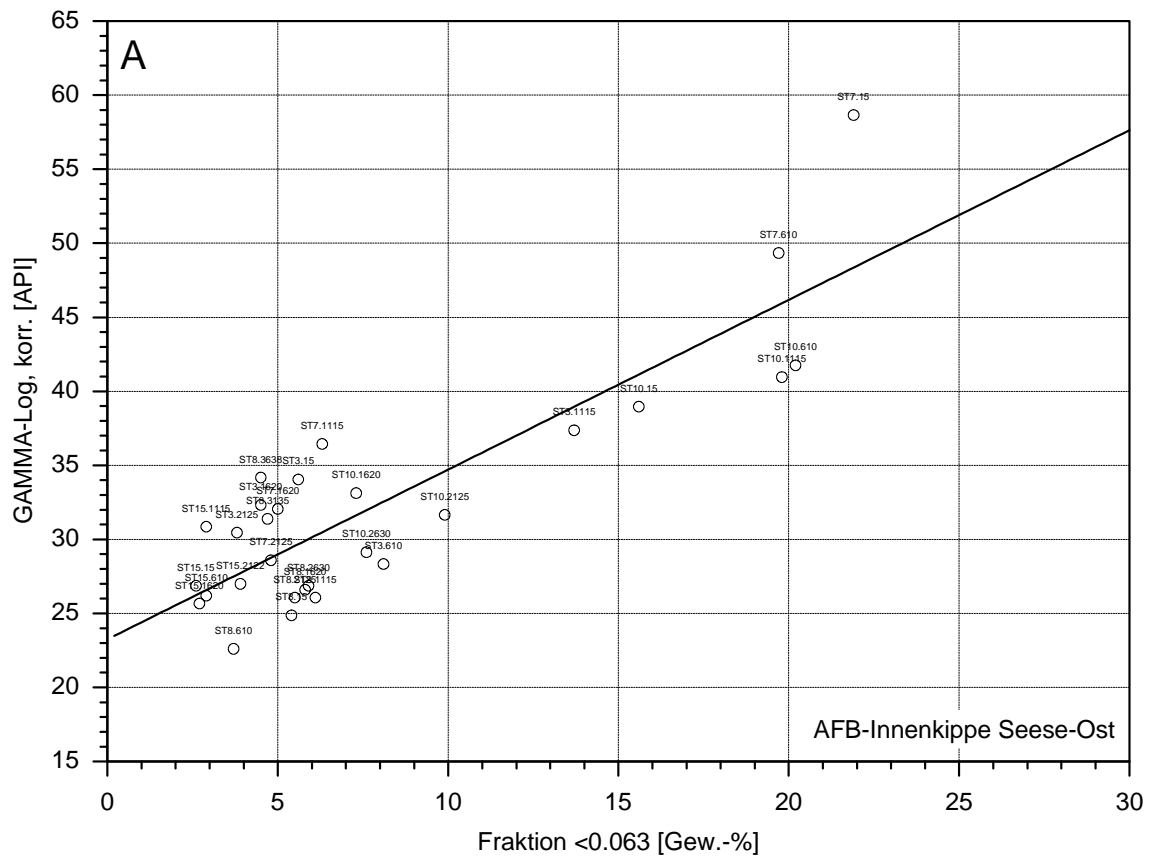


Abbildung 5-1 Meßwert GAMMA-Log [API] in Abhängigkeit vom Feinkornanteil, Abraumschüttung Seese-Ost (A), Abraumschüttung Meuro (B).

Für zwei Punktgruppen, entsprechend Teufenbereichen der Abraumschüttung der ST8 (feinkörnig und feinkornanteilreich) sowie der ST15 (vergleichsweise grobkörniger und feinkornanteilärmer) fällt der bei unterschiedlichem Feinkornanteil um 6 bzw. 2,5 Gew.-% einheitliche Meßwert um 26,5 API auf. Die Ursache ist unklar!

GAMMA-Log (GR-BLM) und Feinkornanteil - Abraumschüttung Meuro

Der Wertebereich von Feinkornanteil und Meßwert des GAMMA-Logs unterscheidet sich für die Abraumschüttung Meuro, Abb. 5-1 (B) nur unwesentlich von dem der Abraumschüttung Seese-Ost. Das Gesamtfeld der den 5 m - Teufenabschnitten entsprechenden Punkte folgt im Trend der Relation höherer API-Werte der GR-Bohrlochmessung infolge zunehmenden Feinanteils. Der Anstieg der API-Meßwerte mit zunehmenden Feinkornanteilen erfolgt jedoch stärker als für Seese-Ost. Dies wird wahrscheinlich durch *gamma-aktive Glimmer der Hangendschluffe* hervorgerufen.

Wie bei Seese-Ost sind für die Abraumschüttung Meuro bohrungsweise spezifische Wertefelder auszumachen. Die Gruppe der Bohrungen MT1, MT8, MT13 und MT15 bzw. entsprechende Bereiche der Kippe zeigt für große Bandbreiten an Feinkornanteil zwischen 3,7 und 25,3 Gew.-% eine starke Variation der GR-Meßwerte von 18 bis 56 API.

Davon weicht die Anordnung der Werte der MT5, MT10 ab. Sie ist durch eine geringe Variation des Feinkornanteils gekennzeichnet, dessen Zunahme von abnehmenden GAMMA-Log-Meßwerten begleitet werden. Die Ursache ist unklar!

5.3.1.2 Verteilung des Feinkornanteils im Abraumschüttungskörper Seese-Ost

(Anlagenheft). Die Anteile Fraktion $< 0,063$ mm variieren von praktisch 0 im drehpunktnahen Kippenbereich, Bohrung SS11 bis zu Werten um 20 % vor allem im oberen Vertikalabschnitt der Schüttung, Schwenkende, östlicher Teilbereich des Kippenmassivs, ST7 und ST10, PS (8) – (8) (N - S).

Die Wertebereichseinteilung Anteil Fraktion $< 0,063$ mm in den Abraummischungen Seese-Ost und Meuro erfolgt in < 5 , 5-15, 15-25 und > 25 %. Zur Untergliederung der teilweise sehr hohen Feinkornanteile in Meuro wurde somit die in der Bodenmechanik übliche Zuordnung in nicht bindige (unter 5 %), bindige (5 bis 15 %) und stark bindige (über 15 %) „Böden“ erweitert.

Feinkornanteile *unter 5 %* sind charakteristisch für den unteren Teil der Abraumsediment-schüttung. Niedrige Gehalte über die gesamte Schüttungsmächtigkeit treten im *Drehpunktbereich* sowie im Schüttungsbereich, Bohrung ST15 auf. Werte von 5 bis 15 % $<$

0,063 mm sind für die Schüttung im Kippenbereich „*mittleres Strossendrittel*“ zwischen D.P. und Schwenkende kennzeichnend.

Als Bereich mit überwiegend bindiger Abraumschüttungsfolge ist dieses Kippengebiet auch in PS (4) – (4) (N – S) und PS (6) – (6) (N – S) sowie in der W – E Entwicklung der PS (1) – (1) (SW – NE) und PS (5) – (5) zu erkennen. Abweichend davon sind Feinfraktionsanteile *über 15 %* in diesem Kippenbereich im oberen Teil, Bohrung SS5 anzutreffen und im übrigen beschränkt auf den oberen Teil der Schüttungsfolge im östlich gelegenen Schwenkende des Tagebaus, PS (8) – (8) (N – S).

Eine systematische Zunahme des Feinkornanteils vom nicht bindigen D.P.-Bereich bis zum stark bindigen Tagebau-Schwenkende wird deutlich in PS (5) – (5) (W – E), abgeschwächt in PS (1) – (1). Ein Anstieg Anteil Fraktion $< 0,063$ mm der jeweiligen Basisprobe bei der ST3, ST7, der SS14 und ST15 ist auf erbohrten Liegendenschluff zurückzuführen.

Vom Kippenbasisbereich ausgehend ist bei 45 bis 55 m NN ein gravierender Anstieg des Feinkornanteils festzustellen, besonders markant bei den Schüttungsbereichen Bohrungen ST3, SS5, ST7 und ST10 im mittleren Strossendrittel und Schwenkende.

Für die *Herkunft* besonders der mächtigen oberen Schüttungsfolgenabschnitte mit Gehalten über 15 % ist Geschiebemergel (Pleistozän) anzunehmen. Sediment des tertiären Deckgebirges, das als Quelle nennenswerter Feinkornanteile in den Abraumschüttungsmassen in Frage kommt, sind ausgehaltene Flöz-Zwischenmittel (im drehpunktnahen Strossendrittel nicht ausgehalten) sowie der durchschnittlich ~ 1,5 m mächtige Flöz-Hangendschluff.

Insgesamt sind starke und zum Teil systematische Änderungen des Feinkornanteils, vertikal wie lateral über das Kippenmassiv festzustellen. Tendenziell steigen die Gehalte zum Hangenden der Schüttungsfolgen an, zum Teil mit einer deutlichen 2-Teilung im Vertikalprofil. Ein gering feinkornführender unterer Teil (Vorkippe) wird überlagert vom oberen Teil der Abraumschüttung (Hauptkippe), in dem die Feinkornanteile um Faktor 2 variieren können.

5.3.1.3 Verteilung des Feinkornanteils im Abraumschüttungskörper Meuro

(Anlagenheft). In der Abraumschüttungsmischung Meuro erreichen die Feinkornanteile (Anteil Fraktion $< 0,063$ mm) in großen Teufenabschnitten Werte über 15 Gew.-%. Zusätzlich zur in der Bodenmechanik genutzten Einteilung nach Feinkornanteil der „Böden“ wurden die Wertebereiche 15 bis 25 „stark bindig“ und > 25 % „sehr stark bindig“ ausgeschieden.

Die S – N Profilschnitte, PS (4) – (4), PS (6) – (6) und PS (8) – (8) weisen eine Änderung von *bindig (5-15%) bis stark bindiger Schüttungsfolge im Süden* über großenteils *sehr stark bindige Schüttung im Zwischenbereich* zu wiederum „nur“ *bindiger bis stark bindiger Abraummischung im Schwenkende, nördlicher Tagebaurand* aus. Nur in diesem Kippenbereich (MT15) werden um 10 m Teufenintervall *nicht bindige Abraumschüttung* angetroffen.

Grundtendenz für die vertikale Veränderung des Feinkornanteils in der Schüttungsfolge ist die Zunahme zum Hangenden. Der Gegensatz nach Anteil $< 0,063$ mm zwischen dem unteren feinkornärmeren Abschnitt der *Vorkippe* und auflagernder *Hauptkippe* ist deutlicher ausgeprägt in den nördlichen Schüttungsteilen und im östlichen Tagebau-Schwenkende, Bohrung MT 8, vgl. PS (4) – (4) (S – N), PS (6) – (6) (S – N) und PS (10) – (10) (SW – NE). Neben den durchweg höheren Anteilen in der mächtigen Hauptkippenerschüttung treten auch im Bereich der Kippenbasis hohe Feinkornanteile auf. Letztere sind auf erbohrten Liegendenschluff in den Basisproben sowie dem an die Basis der Vorkippe verbrachten „liegendebliebenen Hangendschluff“ zurückzuführen, MT1, MT10, MT13, MS14 und MT15. Eine Ausnahme bildet die Schüttung, Bereich MS7 mit durchgehend über 20 % Feinkornanteil.

Unterschiedlich deutlich ist eine 3-Teilung im Vertikalverlauf Anteil Fraktion $< 0,063$ mm aller Schüttungsfolgen erkennbar.

Für die *Herkunft* des in der Abraumsedimentmischung Tagebau Meuro festgestellten Feinkorns kommt in Frage: der durchschnittlich 12-15 m mächtige *Hangendschluff* (enthält im Durchschnitt 55 % Fraktion $< 0,063$ mm, Böhme 1980), verkippt in den mächtigen oberen Kippenvertikalabschnitt, „*liegendebliebener Hangendabraum*“ aus Hangendschluff, verbracht an die Basis der Vorkippe, sowie im äußeren nördlichen Bereich der Kippe *Geschiebemergel*. Ohne Vorschnitt und entsprechender Entfernung der pleistozänen Deckgebirgsteile konnten dort diese Anteile in die Abraumsedimentmischung gelangen.

5.3.1.4 Zusammenfassung Fraktion $< 0,063$ mm

Schluffkorngroße Partikel bzw. Aggregate dominieren die Fraktion $< 0,063$ mm. In der Innenkippe Tagebau Meuro sind in mächtigen Teufenabschnitten deutlich *über 15 Gew.-%* Feinkorn enthalten. Das in der Bodenmechanik angewandte Einteilungsschema wurde daher erweitert. *Unter 5 %* (nicht bindig), *5 bis 15 %* (bindig), *15 bis 25 %* (stark bindig) und *über 25 %* (sehr stark bindig).

Jeweils gültig für die Abraumsedimentschüttung Seese-Ost bzw. Meuro wurde eine Beziehung *zwischen GAMMA-Log-Meßwert und Feinkornanteil* aufgestellt. Für letztere ist dabei die durch sandkorngroße *Glimmer der Hangendschluffe* verursachte Erhöhung der Gamma-Aktivität zu berücksichtigen. Mit diesen Relationen können neben den Trockenkernbohrungen auch die *Spülbohrungen* zur Kennzeichnung der vertikalen und lateralen Änderung des Feinkornanteils innerhalb der Abraumschüttungsmassive genutzt werden.

Abraumschüttungskörper Seese-Ost: Gehalte *unter 5 %* kennzeichnen den Drehpunktbereich des ehemaligen Tagebaus, *5 bis 15 %* das mittlere Strossendrittel und *über 15 %* das Schwenkende. Generell steigt der Feinkornanteil zum Hangenden an. Der abrupte Übergang vom gering feinkornführenden unteren Teil, Vorkippe zur feinkornreicheren Hauptkippenschüttung erfolgt bei 40 bis 55 mNN.

Abraumschüttungskörper Meuro: In der Innenkippe überwiegen Gehalte größer *15 %*. Feinkornanteile *unter 15 %* bleiben auf bis 15 m Vorkippenschüttung und mächtigere Abschnitte der Schüttungsfolge im Süden und im Schwenkende, nördlicher Tagebaurand beschränkt. *Über 25 %* Anteil $< 0,063$ mm kennzeichnen den Zwischenbereich. In der Tendenz steigt der Feinkornanteil zum Hangenden, im Vergleich zum Abraumschüttungskörper Seese-Ost jedoch häufig *mit allmählichem Übergang*, der in allen Schüttungsbereichen noch eine Dreiteilung der Abraumschüttungsfolge nach Anteil $< 0,063$ mm erkennen läßt.

5.4 Hydraulische Leitfähigkeit

Die Durchlässigkeitseigenschaften der Abraumsedimentschüttung müssen zur Beurteilung der hydraulischen und stofflichen Zustände beim Grundwasserwiederanstieg und der sich langfristig in der Bergbaufolgelandschaft entwickelnden Grundwasserdynamik bekannt sein.

- Die Kenntnis der kf-Wert-Verteilung im Raum der Kippenkörper ist notwendig für die *Prognose der Grundwasserstandsentwicklung* (raum-zeitlich) in den neu entstandenen AFB-Innenkippenkörpern selbst und damit dem Grundwasser- bzw. Seewasserspiegel im *System Bergbaufolgelandschaft* mit Gewachsenem – AFB-Innenkippe – Restlochsee,
- Der stationäre *Ziel-Grundwasserstand* bestimmt die Anbindung der Restlochseen an die *Vorflut*,
- Der *Ziel-Grundwasserstand* wirkt über den Flurabstand zur Kippenoberfläche auf die künftige Nutzung dieser Flächen, Tabelle 5-1.
- Für *Prognosen des Migrationsverhaltens von Stoffen*, die aus hydrochemischen Vorgängen im Reaktionskörper AFB-Innenkippe (Sickerwasser, aufgehendes Grundwasser) resultieren und welche die *Beschaffenheit* des Kippenwassers, des Restlochseewassers und im Abstrombereich gewonnenen Trinkwassers beeinflussen, muß die Durchlässigkeit bekannt sein.

Nutzung	Grundwasserflurabstand
Standfestigkeit, Begehrbarkeit und Befahrbarkeit unverdichteter Kippen	bodenmechanische Forderung zur Gewährleistung ist ein Flurabstand > 3 m
Landwirtschaft	bei Flurabstand <ul style="list-style-type: none"> • >2 m keine weitere Anforderung • < 2 m Aussagegenauigkeit im dm-Bereich erforderlich
Forstwirtschaft	Flurabstand > 3 m als Aussage ausreichend
Errichtung von Bauwerken	Aussagen über Flurabstand zur Gefährdung des Bauwerks durch Sackungen <ul style="list-style-type: none"> • >10 m: keine Sackungen, • 3... 8 m: Sackungen weitgehend abgeklungen, • < 3 m: Standfestigkeit nicht gewährleistet (Verflüssigungsgefahr)
Bildung von Feuchträumen	möglich bei Flurabstand < 10 m
Deponien	Flurabstand > 1 m unter Sohle Deponie

Tabelle 5-1 Anforderungen bei unterschiedlicher Nutzung von Kippenflächen an den Grundwasserflurabstand, nach Reichel et al. 1992.

„Die Prognose der Grundwasserverhältnisse und der Wechselbeziehung zwischen Grundwasser und Bergbaufolgelandschaft bedeutet eine der zentralen Aussagen über Funktionieren oder Nichtfunktionieren, Nutzbarkeit oder Unbrauchbarkeit der Bergbaufolgelandschaft“, Reichel et al. 1992.

Den ungünstigen *Auswirkungen der Grundwasserstandsentwicklung* (Flurabstand) wie z.B. Vernäbung im Anstrom auf relativ geringerdurchlässige Kippen sind, je nach vorgesehener Nutzung geeignete Maßnahmen entgegenzusetzen. Fischer & Kaubisch 1992 zufolge z.B. das Einbringen von *Grundwasserdurchlässen*.

Eine *Ablenkung des Grundwasser-Fließweges*, begründet im Bau der AFB-Innenkippen wird durch die *undurchlässigeren Lagen* der in Abbaurichtung geneigten Wechsellagerung („Fächerstellung“) hervorgerufen. Reichel et al. 1989 berücksichtigten die Anisotropie mit $5 \cdot 10^{-5} \text{ ms}^{-1}$ in Strossenrichtung und $5 \cdot 10^{-7} \text{ ms}^{-1}$ in Aufschwenkrichtung bei der Berechnung des Wasserdurchstroms.

Beim Aufgehen des *Grundwassers* durch den Kippenkörper werden unterschiedliche Durchlässigkeitsverhältnisse die Eindringgeschwindigkeit des Wassers in diejenigen Bereiche der AFB-Innenkippen, in denen die *Reaktionen* mit der Abraummischung überwiegend stattfinden, beeinflussen. Dies sind wegen des meist kombinierten Auftretens von reaktionspartnerreichem Sediment und hohen Feinkornanteilen geringer durchlässige Bereiche in der Kippe. Je nach vertikaler Ausdehnung dieser *Reaktionsbereiche* kommt es gegenüber dem weiter ansteigenden Grundwasser im übrigen Kippenkörper zur *Verzögerung* der randlich einsetzenden chemischen Umsetzungen.

Zur Beurteilung der Konsequenzen von *hydraulischen, hydrogeochemischen* und *bodenmechanischen* Vorgängen in Abhängigkeit von der Entwicklung des Grundwasserstands und dem künftigen lateralen Durchstrom ist somit die Kenntnis der Durchlässigkeitsänderungen im Raum der Kippenkörper notwendig.

Für die *Wasserbewegung* nutzbarer intergranularer Hohlraum ist bei Lockersedimenten wie der hier untersuchten Abraummischung wesentlich auf die durch die *Kornverteilungscharakteristik* bestimmte Kornpackung zurückzuführen.

Tabelle 5-2 und Abbildung 5-2 zeigen den Einfluß der *Korngrößencharakteristik* auf die Durchlässigkeit. Zum Teil selbst Merkmal der Korngrößenverteilung sind die durchlässigkeitswirksamen Einflußgrößen.

- Spezifische Kornoberfläche $O=6/d_w$, d_w =wirksamer Korndurchmesser (z.B. $k_f=1,16 \cdot 10^{-4} d_w^2$ [m s⁻¹]),
- Feinkornanteil,
- Korneinregelung,
- Sättigung S_r , stark durchlässigkeitserhöhend: $k_f(S_r = 1,0) / k(S_r = 0,8) = 4$. Dies betrifft den Zustand beim Aufgang des Grundwassers in die Grundluft und Restfeuchte enthaltende Abraummischung.

	Porenanteil n [-]	nutzbarer Porenanteil n_f [-]	n_f [in % von n]	Bergfeuchte (n – n_f)	k_f [m s ⁻¹]	Bezeichnung nach DIN 18130, Tl. 1
Ton, schluffig	0,45-0,65	0,02-0,05	4-10	0,40-0,63	$\approx 10^{-8}$	schwach durchlässig
Schluff, tonig	0,40-0,55	0,03-0,08	10-20	0,32-0,52	10 ⁻⁸ bis 5 10 ⁻⁶	schwach durchlässig bis durchlässig
Schluff, sandig	0,35-0,45	0,05-0,10	12-30	0,25-0,40	10 ⁻⁶ bis 5 10 ⁻⁵	durchlässig
Sand, schluffig	0,33-0,40	0,08-0,12	20-36	0,21-0,32	10 ⁻⁵ bis 2 10 ⁻⁴	durchlässig bis stark durchlässig
Mittelsand	0,30-0,38	0,10-0,15	30-50	0,15-0,28	10 ⁻⁴ bis 4 10 ⁻⁴	stark durchlässig
Sand, kiesig	0,28-0,35	0,15-0,20	50-60	0,08-0,20	2 10 ⁻⁴ bis 10 ⁻³	stark durchlässig
Kies, sandig	0,25-0,35	0,20-0,25	60-80	0,00-0,15	5 10 ⁻⁴ bis 3 10 ⁻³	stark durchlässig

stark bindig (15-40% < 0,063 mm)					10 ⁻¹¹ bis 10 ⁻⁷	
bindig (5-15% < 0,063 mm)					10 ⁻⁷ bis 10 ⁻⁵	
nicht bindig (unter 5 % < 0,063 mm)					10 ⁻⁵ bis 10 ⁻²	

Durchlässigkeiten nach DIN 18130, Tl. 1		zugehörige hydrogeologische Begriffe für Grundwasserleiter
< 10 ⁻⁸	sehr schwach durchlässig	< 10 ⁻⁸ Quasinichtleiter
10 ⁻⁸ bis 10 ⁻⁶	schwach durchlässig	< 10 ⁻⁵ GW-Hemmer bzw. GW-Geringleiter
10 ⁻⁶ bis 10 ⁻⁴	durchlässig	> 10 ⁻⁵ (Kluft) GW-Leiter
10 ⁻⁴ bis 10 ⁻²	stark durchlässig	> 10 ⁻⁴ (Poren) GW-Leiter
> 10 ⁻²	sehr stark durchlässig	

Tabelle 5-2 Durchlässigkeitsbeiwerte k_f natürlich abgelagerte klastischer Lockersedimente verschiedener Korngrößenzusammensetzung, nach Busch et al. 1993 – Bezeichnungen der Durchlässigkeit nach DIN 18130, Tl. 1

Das Verfahren für die Ermittlung des k_f -Werts in den Abraummischungskörpern muß berücksichtigen und erreichen:

- Die Abraumschüttung ist *locker* gelagert,
- Die gesamte Kippe befindet sich derzeit oberhalb der GW-Spiegels – „*trockene Kippe*“
- Die *Veränderung* der k_f -Werte im *Kippenraum* muß mit dem Verfahren bestimmbar sein.

Am geeignetsten ist die Ermittlung des k_f -Werts aus der *Korngrößenverteilung der Bohrkernproben*, die für die entsprechende Kippenjahresscheibe und den 5m-Vertikalabschnitt der Abraummischungsfolge repräsentativ sind. Auf diese Weise wird der starke und *bleibende Einfluß der durchflußbestimmenden Partikelgrößenverteilung* berücksichtigt, der auch nach der Sackung der locker lagernden Schüttungsmassen infolge Korngefügezusammenbruch beim Durchgang der Wasserfront des wiederaufgehenden Grundwassers wirksam ist.

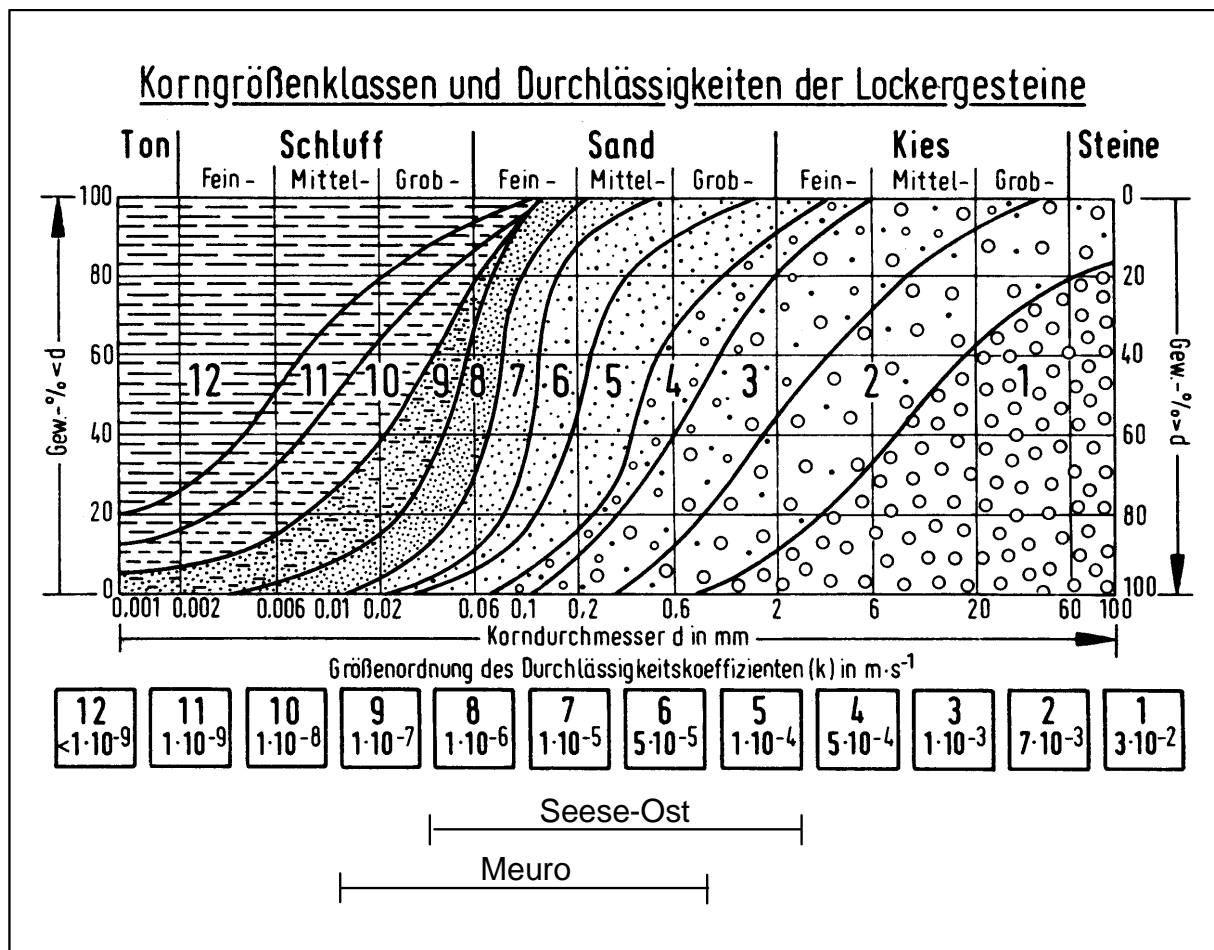


Abbildung 5-2 Abhängigkeit des Durchlässigkeitsbeiwerts von der Korngrößenverteilung von Lockergesteinen, Breddin (Krapp 1983) in Prinz 1997.

Mit direkten k_f -Ermittlungsmethoden, bei denen Wasser über Bohrungen in die trockene und lockere Abraumschüttung gebracht wird, z.B. Auffüllversuch, besteht für die Messung in den lockeren Abraumschüttungsmassen die Gefahr, daß neben der im Maß abweichenden Vorwegnahme der Sackung infolge Grundwasserwiederanstieg auch Erosion und Kolmation, insgesamt also Korngefügeveränderungen *verfälschend* wirken. Rolland et al. 2000

bestimmten für die Abraummischung Tagebau Gräbendorf 3,34 10^{-6} mittels Slugtest gegenüber 1,41 10^{-4} mittels Naßsiebung (Seelheim). Der direkte Durchlässigkeitsversuch ist schon wegen der hierfür notwendigen ungestörten Proben, die darüberhinaus nur für jeweils ~ 20 cm gültig sind, ebenfalls nicht geeignet.

5.4.1.1 Ermittlung des Durchlässigkeitsbeiwertes aus Parametern der Korngrößenverteilung

Der empirisch belegte Zusammenhang zwischen Korngröße, Korngrößenverteilung und Durchlässigkeit eines Lockersediments nach Beyer 1964 liefert für *natürlich abgelagertes Sediment* nach vergleichenden Methoden-Untersuchungen zutreffende Ergebnisse, Pekdeger & Schulz 1975. Die Relation $k_f = C^* \times d_{10}^2$ berücksichtigt den Einfluß der *Sortierung* nach Korngröße (Neigung der Kornsummenkurve) auf die Durchlässigkeit über die Verwendung des Proportionalitätsfaktors C^* in Abhängigkeit von der Ungleichförmigkeitszahl U und über d_{10} - als Ausdruck des oberflächenwirksamen Korndurchmessers - die besonders durch den *Feinkornanteil* wirksame Verringerung der Porendurchflußquerschnitte infolge der Adsorptionshülle (Haftwasser) um die Partikel. Entenmann 1992 empfiehlt das Vorgehen nach Beyer 1964 insbesondere wegen des großen Wertebereichs von k_f mit zuverlässigen Ergebnissen.

Darüberhinaus sind die in der *Praxis* des Niederlausitzer Braunkohlen- und Sanierungsbergbaus mit in der Region abgelagerten Sedimenten der tertiären und quartären Deckgebirgsfolgen gemachten Erfahrungen bei Durchlässigkeitsermittlungen zu berücksichtigen. Eigenschaften wie die *Kornform* als Folge der regionaltypischen Sedimentbildungs- bzw. Ablagerungsbedingungen, die neben der Korngrößenverteilung ebenfalls die Durchlässigkeit beeinflussen, sind dabei miteinfaßt. Die Unternehmen LAUBAG und LMBV wenden zur k_f -Wertermittlung für ihre Fragestellungen zu Tagebauentwässerung (Bemessung Randriegel-System) und Entwässerung trockenzuhaltender Kippen sowie Errechnung der GW-Standsentwicklung in den Kippen die Methode nach Beyer 1964 (Naßsiebung) an und im Falle bindigen Sediments den Durchströmungsversuch, Kloß (mdl. Mittlg.) 1999.

Ausgehend von den Arbeiten Zieschang 1964 und Bamberg & Häfner 1981 vergleichen Kaubisch & Fischer 1984a, b und 1985 die Ergebnisse von Naßsiebung/ k_f -Wert-Berechnung nach Beyer 1964 mit Durchströmungsversuchen (direkter Durchlässigkeitsversuch) und belegen für die untersuchten feinkornanteilreichen Kippensedimente die starke Korrelation zwischen Anteil Fraktion $< 0,063\text{mm}$ und dem Durchlässigkeitsbeiwert k_f . Somit konnte bei

vorliegender Arbeit auf die empirisch an Sedimenten des Niederlausitzer Braunkohlereviere erarbeitete Beziehung, Autorenkollektiv 1984 in Kaubisch 1986 zurückgegriffen werden:

$$k_f = 10^{0,0005P^2 - 0,12P - 3,59} \text{ [m s}^{-1}\text{]} \quad 60\% > P > 10\% \quad P = \text{Anteil Fraktion} < 0,063 \text{ mm [\%]}$$

Diese Ermittlung des k_f -Wertes aus einem Parameter der Korngrößenverteilung für Abraummischungen mit über 10 % Feinkornanteil ist gleichzeitig die Basis für die Ermittlung des Durchlässigkeitsbeiwerts der Abraumschüttungsfolgen in den *Spülbohrungen*. Hierzu konnten die aus der Gamma-Intensität ermittelten Anteile Fraktion < 0,063 mm genutzt und k_f nach oben genannter Relation errechnet werden.

Für die Abraumsedimentmischungen Seese-Ost und Meuro fallen die *Gültigkeitsgrenzen* für die Verwendung der Beziehung nach Beyer 1964 ($d_{10} < 0,06 \text{ mm}$) und die für den Feinkornanteil zusammen.

Der Grund für die Qualität der von Kaubisch 1986 genutzten Korrelation zwischen Feinkornanteil und k_f ist wahrscheinlich der besonders bei den *lockeren Abraumschüttungsmassen* starke Einfluß des durchflußbestimmenden Feinfraktionsanteils. Eine Einregelung in dichtere, den Durchfluß reduzierende Kornpackungen, abhängig von der gesamten Korngrößenverteilungscharakteristik wird durch den Schüttungsvorgang nicht erreicht.

5.4.1.2 Die Durchlässigkeitseigenschaften im Abraumschüttungskörper Seese-Ost

(Anlagenheft). Die ermittelten Durchlässigkeitsbeiwerte reichen im wesentlichen von 10^{-6} bis 10^{-4} m s^{-1} . Die Abraumschüttungsmassen der Innenkippe Seese-Ost sind damit als *durchlässig (DIN 18130)* zu bezeichnen. Innerhalb dieses Wertebereichs bestehen in den Teufenprofilen der Bohrungen sowie lateral systematische Veränderungen. Zur Veranschaulichung der Variation von k_f in den untersuchten Abraummischungen (Seese-Ost und Meuro) wird folgende Einteilung vorgenommen.

[m s ⁻¹]	DIN 18130	
10^{-7} bis 10^{-6}	schwach durchlässig	
1 bis $5 \cdot 10^{-6}$	durchlässig	
$5 \cdot 10^{-6}$ bis 10^{-5}		
1 bis $5 \cdot 10^{-5}$		
$5 \cdot 10^{-5}$ bis $2,5 \cdot 10^{-4}$	durchlässig	stark durchlässig ($> 1 \cdot 10^{-4}$)

Die *höchsten*, für Seese-Ost bestimmten Durchlässigkeiten, maximal $2,5 \cdot 10^{-4} \text{ m s}^{-1}$, Bohrung SS11 sind charakteristisch für den *drehpunktnahen Kippenbereich*.

Überwiegend Durchlässigkeit *1 bis 5 10-5* charakterisiert die Schüttung im „mittleren Strossendrittel“ zwischen D.P. und Schwenkende. Dies wird mit dem (N – S) Profilschnitt (4) – (4) sowie in der W – E Entwicklung der PS (1) – (1) (SW – NE) und PS (5) – (5) deutlich. Gravierend davon weicht die Schüttung Kippenbereich Bohrung SS5 ab, in der Durchlässigkeiten um *10-6* auftreten.

Das Zurückgehen der Durchlässigkeit im Bereich der jeweiligen Kippenbasisprobe, Bohrung ST3, ST7, SS14 und ST15 ist auf erbohrten Liegendenschluff zurückzuführen. *Geringere Durchlässigkeit (10-6 bis 10-5)* mächtigerer Vertikalabschnitte kennzeichnen insbesondere die oberen Abschnitte der Abraumschüttung im Schwenkende, PS (8) – (8) (N – S), Bohrungen ST7 und ST10 und im mittleren Strossendrittel, Bohrung SS5.

Für die Schüttung, Bereich Bohrung ST7 ist der Kontrast eines durchlässigeren Kippenunterteils und geringer durchlässigen Kippenoberteils am deutlichsten. Eine *vertikale 2-Teilung* der Abraumschüttungsfolge in einen durchlässigeren Basisteil (Vorkippe) und einen vergleichsweise geringer durchlässigen oberen Teil (Hauptkippe) ist ebenfalls erkennbar in den Bereichen der Abraumschüttung SS1, ST3, SS4, SS5, SS9, ST10, SS14. Nach kf einheitlich ist die Schüttungsfolge, Bohrungen ST8 und ST15. Der Übergang zu dem geringer durchlässigen Kippenoberteil konzentriert sich im Bereich 45 m bis 55 m NN.

Die *Vorkippe* zeigt die höchsten Durchlässigkeiten (*10-4*) im *nördlichen Bereich*, PS (1) – (1) (W-E); abgesehen von SS11 im Drehpunktbereich nehmen sie in Aufschwenkrichtung im Zuge der weiteren Tagebauentwicklung auf *1 bis 5 10-5* ab.

5.4.1.3 Die Durchlässigkeitseigenschaften im Abraumschüttungskörper Meuro

(Anlagenheft). *35 m mächtige Vertikalabschnitte* (MS7 50 m) der Abraumschüttung Meuro weisen Durchlässigkeitsbeiwerte unter *10-6 m s-1* auf, *schwach durchlässig*. Wie für die Abraumschüttungsfolge Seese-Ost wurde die Unterteilung nach DIN 18130 zur Kennzeichnung von Änderungen in den Schüttungsfolgen ergänzt.

Durchlässigkeitsbeiwerte oberhalb *5 10-5 m s-1* treten in der Abraumsedimentmischung Meuro nicht auf. Tendenziell nimmt die Durchlässigkeit in der Schüttungsfolge *zum Hangenden ab*. Unterschiedlich deutlich in den verschiedenen Bereichen der Innenkippe Meuro ist eine 2- bis 3-Teilung der Vertikalabfolge ausgebildet. *Schwach durchlässig* ist die Abraumschüttung im *oberen Vertikalabschnitt* (MS7 durchgehend) im inneren Kippenbereich zwischen Drehpunkt und Schwenkende, Bohrungen MS7, MS9, MS11, MS14, PS (3) – (3) (Anlagenband) und (5) – (5).

Die S – N Profilschnitte, PS (4) – (4) und (6) – (6) zeigen eine Änderung von Schüttungsfolgen mit kf, überwiegend zwischen 5 10-6 bis 5 10-5 im Süden über die Schüttung im Zwischenbereich mit schwach durchlässiger Abraummischung der mittleren und oberen Kippenvertikalabschnitte zu wieder durchlässigerer Abraummischung im Schwenkende, nördlicher Tagebaurand mit kf bis 5 10-5 aus. Nur in diesem Kippenbereich wird über 10 m mächtig Abraumschüttung mit $k_f > 10^{-5} \text{ m s}^{-1}$ angetroffen, PS (4) – (4), Bohrung MT15.

Der Unterschied zwischen der Vorkippe und auflagernden geringer durchlässigen Hauptkippenschüttung ist deutlicher ausgeprägt im Schüttungsbereich nördlich Bohrungen MT1, MT5, MS7, MS9 und im östlichen Schwenkende, Bohrung MT 8, vgl. (S – N) Profilschnitte (4) – (4), (6) – (6) und Profilschnitt (10) – (10) (SW – NE). Der Einsatz des schwach durchlässigen oberen Abschnitts der Schüttungsfolge liegt um 65 bis 70 m NN. Der Vertikalabschnitt der Vorkippe ist in der Position der MS3 nicht erbohrt. Minimale Durchlässigkeit im unteren Kippenabschnitt sind durch erbohrten Liegendenschluff in den Kippenbasisproben sowie dem an die Basis der Vorkippe verbrachten „liegendebliebenen Hangendschluff“ zurückzuführen, MT1, MT10, MT13, MS14 und MT15.

5.4.1.4 Zusammenfassung Durchlässigkeitsbeiwert k_f

Für die Durchlässigkeitseigenschaften der geschütteten und locker lagernden Abraummischung in den Kippenkörpern sind Änderungen in der Zeit zu erwarten. Eigensetzung, Korngefügeeinregelung beim Grundwasseraufgang und möglicherweise Erosion/Kolmation durch GW-Bewegung in der rollig/bindig Wechsellagerung sind die Ursachen.

Die in vorliegender Untersuchung angewandte Ermittlung des k_f -Wertes aus Parametern der Korngrößenverteilung berücksichtigt den bleibenden Einfluß der Korngrößenverteilungscharakteristik auf die Durchlässigkeit der Kippenmassive, wirksam auch nach dem Durchgang des wiederaufgehenden Grundwassers mit durchlässigkeitsvermindernder Korngefügeeinregelung. Bei Feinkornanteilen über 10 % konnte der für Kippenschüttungen des Niederlausitzer Braunkohlenreviers gültige Zusammenhang zwischen Feinkornanteil und k_f -Wert, Kaubisch 1986 genutzt werden. Dies ermöglicht, die aus dem GAMMA-Log der Spülbohrungen gewonnenen Werte Feinkornanteil für die Ermittlung von k_f zu verwenden. Die damit in Kippenabschnitten unter 10 % Feinkornführung ermittelten k_f zeigen eine im Vergleich zur Ermittlung auf Basis der gesamten Korngrößenverteilung (Beyer 1964) um Faktor 1,3 höhere Durchlässigkeit an.

Die k_f -Werte in den untersuchten Abraummischungen variieren vor allem zwischen 10^{-7} und 10^{-4} , nach DIN 18130 *schwach durchlässig bis durchlässig*. Um die im erkundeten Kippenraum festgestellten systematischen Veränderungen des k_f -Wertes erkennen zu können (Konstruktion der Isolinienpläne), wurden engere k_f -Intervalle festgelegt.

Abraumschüttungskörper Seese-Ost (10^{-6} bis $2,5 \cdot 10^{-4}$, durchlässig)

Höhere Durchlässigkeit ist charakteristisch für den *drehpunktnahen* Kippenbereich, überwiegend Durchlässigkeit zwischen 1 bis $5 \cdot 10^{-5}$ im mittleren Strossendrittel. *Geringe* Durchlässigkeit kennzeichnen v.a. den oberen Teil der Kippe im Schwenkende des Tagebaus. Merkmal der Änderung im Vertikalen ist ein *gut durchlässiger Basisteil* (Vorkippe) und vergleichsweise *geringer durchlässiger oberer Teil* (Hauptkippe). Der Übergang zum geringer durchlässigen Kippenoberteil erfolgt v.a. zwischen 45 und 55 mNN.

Die Veränderung von der anstehenden Deckgebirgsfolge im Tagebau Seese-Ost mit terrestrischen „Seeser Sanden“ als *GWL* ($k_f 2 \dots 6 \cdot 10^{-4}$) und Geschiebemergel, Bänderschluft als *Grundwasserhemmer* (10^{-7}) zur Abraummischung der AFB-Innenkippe mit $5 \cdot 10^{-5}$ bis $2,5 \cdot 10^{-4}$ der *Vorkippenschüttung* und $1 \cdot 10^{-6}$ bis $5 \cdot 10^{-5}$ der *Hauptkippenschüttung* zeigt, daß die niedrigen Durchlässigkeiten der Grundwasserhemmer in der Abraummischung nicht mehr erreicht werden, die Durchlässigkeit der Vorkippenschüttung etwa der des GWL des Anstehenden entspricht.

Abraumschüttungskörper Meuro (10^{-7} bis $5 \cdot 10^{-5}$, schwach durchlässig bis durchlässig)

Im mittleren und oberen Vertikalabschnitt, entsprechend *1. und 2. Hauptkippenschüttung* ist die Abraummischung vor allem im zentralen Bereich der Kippe großenteils *schwach durchlässig*. Im S', N' und E'-Schwenkendenbereich ist sie *durchlässig* (10^{-6} bis 10^{-4}).

Gegenüber dieser Bandbreite zeigt die Abraummischung in der *Vorkippe* einheitlichere Durchlässigkeitsbeiwerte, überwiegend zwischen $5 \cdot 10^{-6}$ und $5 \cdot 10^{-5}$. Sie erreichen nicht Durchlässigkeiten von $1,2 \cdot 10^{-4}$, die Kaubisch 1986 an „55 Proben“ der Vorkippe Tagebau Jänschwalde ermittelte. In Bohrungen angetroffene Bereiche der Vorkippe mit k_f um $1 \cdot 10^{-6}$ führt er auf feinkornreiches Tiefschnittmaterial zurück.

Die Durchlässigkeit der Abraummischungskörper erreicht in der *Vorkippe* vergleichbare Werte wie in den GWL des Gewachsenen Gebirges; in der *Hauptkippenschüttung* ist sie aufgrund der beigemischten Feinkornanteile durchweg geringer.

Entsprechend dem Aufbau der Vorkippe einheitlich aus rolligem, feinkornarmem Deckgebirgsmaterial existiert in dieser Kippscheibe eine nur geringe *Variabilität* der

Durchlässigkeit im Vergleich zur Hauptkippenschüttung mit teilweise stark wechselnden Feinkornanteilen.

Hülmeyer 2002 untersuchte u.a. die *Ursachen nebeneinander auftretender, sehr unterschiedlich aufgesättigter Bereiche* (aus der GW-Neubildung) in der Abraumkippe Tagebau Cospuden. Er führte dazu Bestimmungen der Hydraulischen Leitfähigkeit im gesättigten und ungesättigten sowie im *verwitterten* (ehemals Böschungsoberfläche der geschütteten Kipprippen) und *unverwitterten* Zustand der Abraummassen durch.

	verwittert	unverwittert
ungesättigt	1,5 10^{-7} ms ⁻¹	4,5 10^{-8} ms ⁻¹
gesättigt	2,1 10^{-6} ms ⁻¹	1,4 10^{-7} ms ⁻¹

Die *in den verwitterten Bereichen jeweils um eine Größenordnung höhere Durchlässigkeit* führte er auf „Abspülung und Ausblasung feinkörniger Anteile sowie den Abtransport der Sulfidoxidaionsprodukte“ zurück.

Durch die geneigt im Kippenkörper angeordneten Schüttungsrippen (mit den ehemals, der Verwitterung ausgesetzten Kippenböschungsoberflächen) besteht die *Wirkung der Verwitterung auf die Durchlässigkeit bis in tiefere Kippenbereiche*.

5.5 Dichte – Porosität - Lagerungsdichte

Diese Eigenschaften der Abraumsedimentschüttung stehen in *enger gegenseitiger Beziehung*. In Literatur zu Untersuchungen an Kippen findet man, „Porosität ist Ausdruck der Lagerungsdichte“ Förster et al. 1991, „Zur Beschreibung der Lagerungsdichte können die Porosität bzw. Porenziffer e verwendet werden“ Kaubisch & Fischer 1984.

Beim Vergleich von Sedimenten ist dieser Schluß streng nur zulässig für den *Fall ähnlicher Korngrößenverteilung*, da zum Beispiel Sedimente mit engem Kornspektrum dicht gelagert und dabei relativ porös sein können. Dies trifft zu für die meist gleichkörnigen und in jedem Fall feinkornanteilarmen Sande und Kiese der *Vorkippe*, die durch dichte Lagerung infolge Eigenlast der auflagernden Abraummassen gekennzeichnet sind.

Gemessen wurde die *Dichte* bei wassergefülltem Porenraum. Die *Porosität* wurde errechnet und deren *Verteilungscharakteristik in den Abraumschüttungskörpern* bestimmt.

Die Porosität steht zum Teil für das *Setzungs- und Sackungspotential* der locker lagernden Abraumschüttung. Nach den Phasen der Primärsetzung (Eigenlast) und Sekundärsetzung mit Kapillar- und Sättigungssackung (Korngefügeeinregelung durch aufgehendes Grundwasser)

kann durch ein Initial wie *Erschütterung* eine Dynamische Sackung erfolgen, für die Wichter & Kügler 2000 in Laborversuchen 3-5 % der Probenhöhe bestimmten.

Die Porositätswerte stellen somit die Basis für die Beurteilung der *maximalen Setzungs- und Sackungsbeträge* dar, „Werte auf der sicheren Seite“. Bei der Bestimmung der Lagerungsdichte mit Drucksondierungen kann diese *überschätzt* werden. Ursache ist in den Kornkontaktmenisken *verfestigend wirkendes Feinkorn*, das durch das aufgehende Grundwasser wieder gelöst wird.

Messungen der *Lagerungsdichte* wurden nicht vorgenommen. Bei der Behandlung der Dichte und der Porosität wird jedoch mehrfach Bezug auf die Lagerungsdichte genommen, welche deshalb zur Abgrenzung gegenüber den Kenngrößen *Dichte* und *Porosität* gesondert erläutert wird.

5.5.1 Dichte

Die Dichte der Abraumschüttung ist Ausdruck der *sedimenteigenen Eigenschaften* und der *Vorgänge* von der Abgrabung bis zur Schüttung auf den Kippenkörper. In den Dichte-Wert der Lockergesteine gehen ein:

- die Dichte der *Kornmatrix der kohlehaltigen Abraumschüttung* 2,585 gcm⁻³ (Matschak 1969c),
- *Porosität* mit den Dichteeigenschaften der Porenfüllung und bei Teilfüllung dem Sättigungsgrad.

Der *Porenanteil* in der Abraumschüttung wird bestimmt durch die Packungsweise der Partikel, welche von

- der *Korngrößenverteilung* (Ungleichförmigkeitszahl *U*, Korngrößenmedian *Md*, Feinkornanteil),
- der *Korneinregelung* beim Schüttungsvorgang auf die Kippe, sowie
- von der *Veränderung nach der Schüttung* wie Verdichtung durch die Eigenlast auflagernder Abraumschüttung und Korngefügeeinregelung durch das aufgehende Grundwasser beeinflusst wird.

Mit der Bohrlochmessung DENSITY-Log (GG) wird die Dichte der Abraumschüttung bei wassergefülltem Porenraum gemessen. RHOR, „Dichte bei Wassersättigung“, Prinz 1997. Diese wurde auch bei der Untersuchung der *Dichte in Abhängigkeit von Kennzahlen der Korngrößenverteilung* verwendet. Die in den *Spülbohrungen* gewonnenen Dichte-Werte

können aufgrund der Kalibration der Meßsonde durch das Meßunternehmen direkt verwendet werden. Die in den verrohrten *Trockenkernbohrungen* gemessenen erhöhten Dichtewerte wurden, wie in der Auswertepaxis üblich, mit einem Faktor 0,75 für den Einfluß der Verrohrung korrigiert, Petzold (mdl. Mittlg.) 2000.

5.5.1.1 Einfluß der Korngrößenverteilung auf die Dichte der Abraumschüttung

Für den in der Praxis der Bohrlochmessungen bisher wenig behandelten Fall *technische Schüttung* ist über die Wirkung der Korngrößenverteilung auf die Dichte wenig bekannt. Anhand der Kenngrößen Ungleichförmigkeitsgrad U und Korngrößenmedian Md wird der Einfluß der Korngrößenverteilung auf die im Bohrloch gemessene Dichte RHOR der Abraummischung untersucht. Bei der Schüttung der Abraummassen, als „technische Sedimentation“ aus dem abgegrabenen Deckgebirge besteht erneut die Möglichkeit zur Einregelung der Partikel zu einer optimal dichten Packung, je nach Korngrößenverteilung der Abraumsedimentmischung, charakterisiert etwa durch die Ungleichförmigkeitszahl U. Die Kornlagerungsverhältnisse (Korngefüge) und damit die Dichte sollten Ausdruck der Korngrößenverteilung der verkippten Abraumsedimente sein.

Abraumschüttung Seese-Ost - Für die Wertepaare (RHOR/U) insgesamt läßt sich eine Relation zunehmender Dichte bei steigendem Ungleichförmigkeitsgrad erkennen, Abbildung 5-3 (A). Es bestehen abgrenzbare Wertebereiche für die Kippenbereiche, resp. Bohrungen. Die Relation zunehmender Dichte bei steigendem Ungleichförmigkeitsgrad ist am ausgeprägtesten für die Schüttung, Bereich Bohrungen ST8 und ST15, abgeschwächt auch bei den beiden Wertepaaren des Kippentiefsten der Bohrung ST10. Wegen unvollständiger Wassersättigung bei der Bohrlochmessung wurden die oberen 20 m der ST10 nicht berücksichtigt. Dies betrifft auch die jeweils obersten 5 m, Bohrungen ST3, ST7 und ST15.

Die drei Wertepaare des tieferen Kippenabschnitts, Bohrung ST7 liegen in einem relativ engen Bereich. Die ST7.610 weicht durch den hohen Wert der Ungleichförmigkeitszahl von 44 bei geringer Dichte von der gezeigten Relation ab. Ursache für die geringe Dichte ist für diesen Teil der Abraumschüttung mit hohem Feinkornanteil (19,7 Gew.-%) aus Geschiebemergel wahrscheinlich die „*klumpige Lagerung*“ von Geschiebemergelbrocken und großem Hohlraumanteil in diesem oberen Kippenteil, wo eine geringe Eigenlast wenig Kompaktion der Schüttungsmassen bzw. Schließen des Hohlraums zwischen den Aggregaten bewirkt.

Die Mehrzahl der Wertepaare (RHOR/Md) folgt der Relation höherer Dichte gröberkörniger Schüttungen, Abbildung 5-3 (B). Neben abgrenzbaren *Wertebereichen der einzelnen Bohrungen* ist die Beziehung abnehmender Dichte bei geringeren Mediankorndurchmessern ausgeprägt in den besonders feinkörnigen Kippenbereichen, Bohrungen ST8 und ST15, die beide einen engen Mediankorndurchmesser-Bereich umfassen und mit max. 6,1 Gew.-% nur geringe Feinkornanteile aufweisen. Die hier anzunehmende *lockerere Lagerung feinerkörniger Abraumschüttung* - bei gleicher Verdichtungsarbeit - ist von *technischen Schüttungen* bekannt.

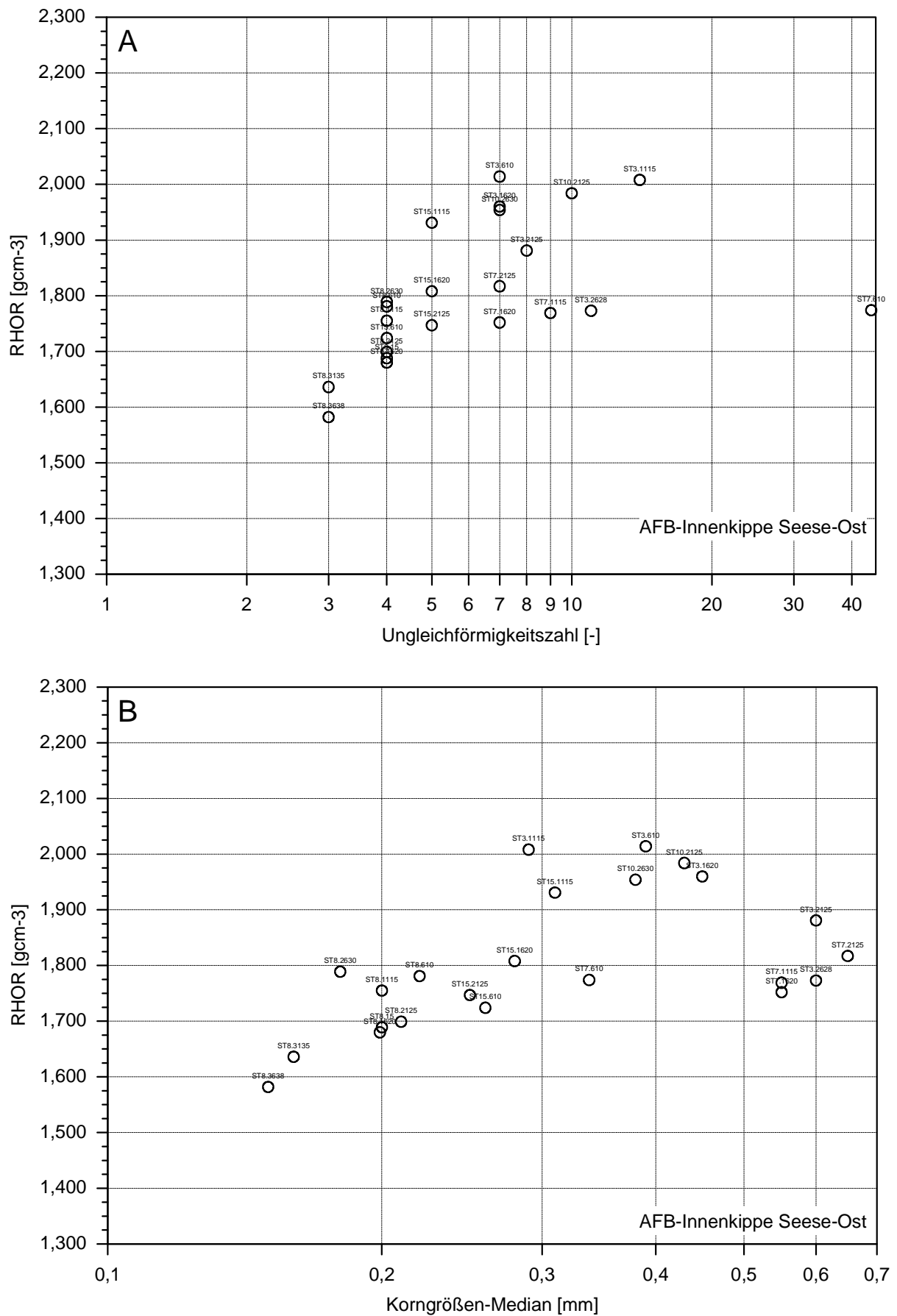


Abbildung 5-3 Dichte RHOR, abhängig von Ungleichförmigkeitszahl (A), und abhängig vom Korngrößenmedian (B), Abraumischung Seese-Ost.

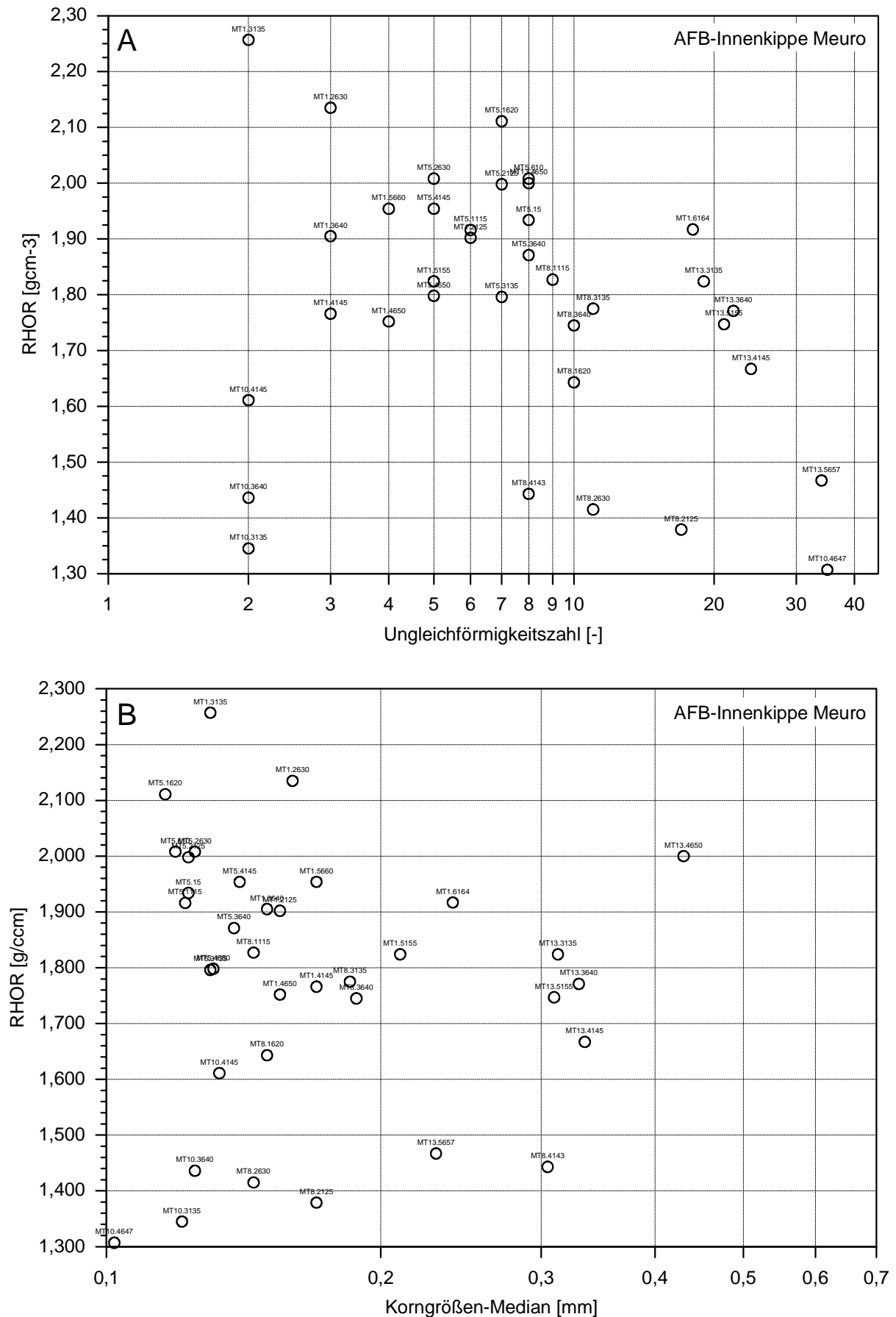
Z.B. Hofmann 1959, Pahl & Wilms 1993. Die Ursache liegt in dem bei feinkörnigem Material auftretenden zahlreicheren Kornkontakten zu benachbarten Partikeln und den dann für eine Einregelung in eine dichtere Kornpackung zu überwindenden hohen *Reibungskräften*. Offenbar ist dies besonders wirksam bei wenig enthaltenem Feinkorn. Konsequenz ist, daß mit abnehmender Korngröße nichtbindiger Lockergesteine zunehmende *Setzungsbeträge* infolge Grundwasserwideranstieg in den Kippen zu erwarten sind.

Abgetrennt vom Hauptfeld tritt mit enger Wertebandbreite ein Bereich mit für die gemessenen Rohdichten verhältnismäßig hohen Medianwerten auf. Gemeinsames Merkmal dieser Teile der Abraumschüttung sind hohe Anteile der Fraktion > 2 mm (im Durchschnitt 16 Gew.-%), die für die Bohrung ST7 die gesamte Kippenschüttung unterhalb 5 m unter Kippenoberfläche, für die Bohrung ST3 unterhalb fünfzehn m ausmachen. Hier führen *hohe Kiesanteile zu einer hohlraumreichen Lagerung* der Schüttung. Abgeschwächt gilt dies auch für ST 3.1620 und ST 7.610 mit 13 bzw. 10,6 Gew.-% an der Fraktion > 2 mm. Der Schüttungsabschnitt ST 7.610 kennzeichnet den Übergang vom feinkornanteilreichen Hangend- zum grobkornanteilreichen Liegendteil für diesen Kippenbereich, Bohrung ST7.

Abraumschüttung Meuro - Dichte und Ungleichförmigkeitszahl erreichen in der Abraumschüttung von Meuro im Vergleich zu derjenigen von Seese-Ost eine erheblich *größere Bandbreite* der Werte, Abbildung 5-4 A. Wie in Seese-Ost sind für die einzelnen *Bohrungen* und damit Abraumschüttungsbereiche *Felder* spezifisch, innerhalb derer die Werte variieren.

Die Bereiche mit den geringsten Dichtewerten stellen die Bohrungen MT8, MT10 und MT13 dar, die Bohrungen MT1 und MT5 repräsentieren Schüttungsmassen mit höheren Rohdichtewerten. Abweichend von der Abraumschüttung Seese-Ost sind für die Relation Rohdichte und Ungleichförmigkeitszahl in der *feinkörnigeren Schüttung Meuro* nicht höhere Dichten bei ungleichförmigerem Sediment festzustellen. Für das Gesamtfeld und verschieden deutlich für die einzelnen Schüttungsbereiche besteht demgegenüber die Tendenz geringerer Dichte einer ungleichförmigeren Abraumschüttung. Die Schüttung der feinerkörnigen Meuroer Abraumischung wirkt sich *nicht* so aus, daß Bereiche mit höherer Ungleichförmigkeit dichter gelagert sind, wie das für natürlich abgelagertes Sediment gilt und für die grobkörnigere Abraumschüttung Seese-Ost auch festgestellt wurde.

Erwartungsgemäß zeigt der aus *gleichförmigem* Schüttgut bestehende Teufenbereich zwischen 30 und 45 m unter Kippenoberfläche, Bohrung MT10 geringe Dichten.



Wie bei den Kippenbereichen, Bohrung ST8 und ST15 der Abraumschüttung Seese-Ost beschrieben, lassen die *Feinkörnigkeit* dieser Abraumschüttungsmassen, verbunden mit einem *geringen Feinkornanteil* höhere Dichtewerte nicht entstehen.

In Frage kommende Ursachen für die bei Teilen der Meuro-Schüttung geringe Dichte ungleichförmigerer Abraumschüttung sind:

1. *Indirekt die stoffliche Zusammensetzung.* Einer Kornanordnung mit optimaler Hohlraumnutzung durch Partikel „passender“ Korngrößen wirkt deren Anreicherung nach Korngröße, Material (Korndichte) und Kornform beim Schüttungsvorgang entgegen. Dies führt eher zur lagenweisen *Trennung von Fraktionen nach Korneigenschaften*, Klassierung und Sortierung.
2. Die *Feinkörnigkeit* der Meuroer Abraumschüttung verhindert die Einregelung der Partikel in eine dichte Lagerung.
3. *Hohe Kiesanteile*, Kippenbereich Bohrungen MT13 und MT15, die Porenraum auch bei ungleichförmigem Sediment bedingen.

Die Abraumschüttungsmassen Meuro sind im Vergleich zu Seese-Ost wesentlich *feinkörniger*. Innerhalb jeweils eines Kippenbereichs/Bohrung existiert ein schmaler Bereich des Korngrößenmedians bei deutlich differierender Dichte. Eine nach Korngröße zu erwartende höhere Dichte - dichtere Lagerung - von grobkörnigerer Schüttung besteht für die Abraumschüttung, Bohrung MT13, abgeschwächt MT10. Für den Schüttungsbereich/Bohrung MT8 ist ein systematischer Einfluß der Körnung auf die Dichte der Schüttung nicht erkennbar, was wahrscheinlich in wechselnd hohen Kohleanteilen begründet ist. Möglicherweise ist das vergleichsweise hohe Schüttungsalter (Teilsatzung), Bohrungen MT1 und MT5 der Grund für die höheren Dichten in diesem Kippenbereich.

Zusammenfassung

Ursache für die festgestellten Wirkungen von „Ungleichförmigkeit“ und „Median“ auf die Dichte ist die besondere *Lagerung* der technogenen Schüttung sowie die *Zusammensetzung* des Deckgebirgeabraums. Die Zusammenhänge sind spezifisch für die Abraumschüttungskörper *Seese-Ost* bzw. *Meuro*, *Schüttungsbereiche* und *Teufenabschnitte*. So bewirken *Geschiebemergelbrocken* mit hohem Feinkornanteil (Abraumschüttung Seese-Ost) eine *Reduzierung der Dichte* (Hohlraum zwischen Agglomeraten), hoher Feinkornanteil der durch mächtigen *Hangendschluff* geprägten Abraumschüttung Meuro dagegen eine *Erhöhung der Dichte*.

Die Dichte der untersuchten Abraumschüttungen wird *herabgesetzt* durch:

- klumpige Lagerung von Agglomeraten (Geschiebemergelbrocken) in Kippenoberteilen bei geringer Auflast (Kompaktion); ST7.610,
- grobklastische kiesreiche Abraumschüttung, auch in tieferen Kippenabschnitten; ST3.2125, ST3.2628, ST7.1115, ST7.1620, ST7.2125,
- die Feinkörnigkeit (Md) des geschütteten Deckgebirgesediments bei geringem Feinkornanteil ($< 0,063$ mm); ST8, ST15; dazu gleichförmige Korngrößenverteilung, ST8.3135, ST8.3638,
- geringen Feinkornanteil bei gleichkörnigem und feinkörnigem Sediment; Kippenunterteil MT8, MT10, MT13.

Die Dichte der untersuchten Abraumschüttungen wird *erhöht* durch:

- hohen Feinkornanteil ungleichförmigen Sediments, ST3.610, ST3.1115, ST7.610, ST10.2125, ST10.2630,
 - Feinkörnigkeit bei hohem Feinfraktionsanteil (gleichmäßig verteilt, aus Hangendschluff); MT1, MT5 - die dichteerhöhende Wirkung eines höheren Feinkornanteils überwiegt den porositätserhöhenden Einfluß der Feinkörnigkeit.
-

5.5.1.2 Verteilung der Dichte RHOR im Abraumschüttungskörper Seese-Ost

(Anlagenband S1.2). Die Dichtemessung DENSITY-Log (GG), wird bei wassergefülltem Bohrloch und Porenraum durchgeführt. In den Bohrungen ST3, ST7, ST10 und ST15 gelang diese Füllung mit Wasser nicht vollständig. Wegen „Teilwassersättigung“ sind Dichtewerte dieser Abschnitte nur im Hinblick auf ihre relative Änderung nutzbar, nicht jedoch die Absolutwerte. Die Dichtewerte der betroffenen Bohrungen setzen daher im Vergleich zum GAMMA-Log (GR) und davon abgeleiteten Sedimentparametern erst entsprechend tiefer ein.

Die gemessenen Dichtewerte RHOR reichen von $\sim 1,6$ bis $\sim 2,0 \text{ g cm}^{-3}$. Die *höchsten Dichtewerte* in den verschiedenen Kippenbereichen treten überwiegend in einem relativ mächtigen zentralen Teufenabschnitt der Schüttungsfolge auf. Innerhalb dieser bis 25 m starken Abschnitte bleibt die Dichte relativ einheitlich und liegt für die Schüttung im D.P.-Bereich, PS (2) – (2) (N – S) zwischen 1,8 und 1,9 g cm^{-3} . Im „Mittleren Strossendrittel“ zwischen D.P. und Schwenkende, PS (6) – (6) (N – S) liegen die mittleren Teufenabschnitte mit 1,9 bis 2,0 g cm^{-3} vor.

Im Kippenbereich, PS (4) – (4) (N – S), Bohrung ST3 zeigt der von der Dichte-Messung erfaßte mittlere und untere Teufenbereich der Schüttungsfolge wiederum die für alle Schüttungen charakteristische Dichte-Abnahme zur Kippenbasis. Dies gilt auch für die Schüttung, Bohrung ST8 mit jedoch zurückgehender Dichte auf 1,6 bis 1,7 g cm^{-3} im zentralen Teufenabschnitt. Die hangendwärts zunehmende Dichte von der Vorkippenschüttung (rollige, feinkornarme Deckgebirgsanteile) zum Hauptschüttungskörper ist im gesamten Abraumschüttungskörper erkennbar. *Anstehender* Liegendenschluff, Bohrungen SS5, SS9 und ST7 führt zu erhöhter Dichte der jeweiligen Kippenbasisprobe.

Zurückgehende Dichten, vom maximal dichten zentralen Teufenbereich zur Kippenoberfläche ist Merkmal für den gesamten Schüttungskörper Seese-Ost. Besonders *ausgeprägt ist dieser Rückgang im D.P.-Bereich, PS (2) – (2).*

Die festgestellte *vertikale Dreiteilung im Rohdichteprofil* ist Ausdruck

- der rolligen, gleichkörnigen feinkornarmen porösen Vorkippenschüttung,
 - des durch auflagernde Schüttungsmassen konsolidierten Mittelteils sowie
 - einem, unabhängig von der petrographischen Zusammensetzung (Feinkornanteil!) locker lagernden Kippenoberteil.
-

5.5.1.3 Verteilung der Dichte RHOR im Abraumschüttungskörper Meuro

(Anlagenband M1.2). Aus Kostengründen erfolgte die geophysikalische Bohrlochmessung in den Trockenkernbohrungen der bis über 60 m mächtigen Abraumschüttung Tagebau Meuro nicht vollständig. Dichteangaben sind für diese Bohrungen über den unteren bis mittleren Teufenbereich möglich; MT1 ab 22,1 m, MT8 ab 13,7 m, MT10 ab 32,8 m und MT13 ab 33,1 m (jeweils liegendwärts). In Bohrung MT15 erfolgte keine Dichtemessung.

Wie für Seese-Ost gilt für die Schüttung Tagebau Meuro überwiegend ein Wertebereich der Dichte von $\sim 1,6$ bis $\sim 2,0$ gcm⁻³. Maximale Dichtewerte werden meist in einem *zentralen Teufenabschnitt* erreicht, PS (4) – (4) (S – N), Bohrungen MT5, MS9, MS14. Im südlichen Kippenbereich mit der *ältesten Schüttung* des untersuchten Teilfeldes Großräschen, Jahresscheibe 1989 liegen maximale Dichten *über 2,0 gcm⁻³*, vgl. PS (10) – (10) (SW – NE) und PS (8) – (8) (S – N), Bohrungen MT1 und MT5. Im PS (8) – (8) (S – N) wird mit Schüttung, Bohrung MS11 der zweite charakteristische Dichte-Teufenverlauf deutlich. Hier ist in der Tendenz eine *von der Kippenoberfläche bis zur Kippenbasis zunehmende Dichte* festzustellen. Noch ausgeprägter ist dies im PS (6) – (6) (S – N), Bohrung MS7.

Die für *alle Schüttungen* im Kippenoberteil in Seese-Ost und Meuro geltende *Dichteabnahme zur Kippenoberfläche* erreicht in Bohrung MS7 die geringsten festgestellten Dichten, $\sim 1,4$ gcm⁻³. Derart niedrige Dichten treten außerdem für einen 10 m mächtigen Abschnitt, Schüttung Bohrung MT8 im äußersten Osten, Schwenkende Tagebau Meuro auf. Der starke Dichterückgang, ausgehend von einem nur unvollständig durch die Dichtemessung erfaßten zentralen dichterem Teufenabschnitt wird durch *hohe Kohleanteile* hervorgerufen.

Unabhängig vom Einfluß der petrographischen Zusammensetzung ist in sämtlichen Bohrungen mit auch im Kippenoberteil erfolgter Dichtemessung (MS3, MT5, MS7, MS9, MS11, MS14) der *Dichterückgang zur Kippenoberfläche* festzustellen. Ein Dichterückgang zur *Kippenbasis* ist nach Verlauf und Dichtewert für die Bohrungen MS9, MT10, MT13 und MS14 wahrscheinlich.

5.5.1.4 Merkmale der vertikalen Dichteänderung

Neben dem Einfluß der *Korngrößenverteilung* zeigen die Ergebnisse der Dichtemessung eine *Tiefenentwicklung* und weisen daraufhin, daß im *Bereich des Drehpunkts* die Dichteabnahme zur Kippenoberfläche ausgeprägter ist als im mittleren und äußeren Strossendrittel.

Häufig besteht in den Bohrungen, Abraumschüttung Seese-Ost und Meuro als Grundschema eine *Dreiteilung des vertikalen Dichte-Profiles*. Ausgehend von einem mächtigeren zentralen Kippenabschnitt höherer Dichte nehmen die Werte zur Kippenbasis und zur Kippenoberfläche ab. Während im Kippenoberteil, unabhängig von der Korngrößenverteilung die Dichte zurückgeht, sind niedrigere Dichten im unteren Vertikalabschnitt der Kippe durch die Standsicherheitsanforderung und daher hier geschüttetes, feinkornarmes Material bestimmt. Auch die größere Auflast der bis über 60 m mächtigen Abraumschüttung Tagebau Meuro führt nicht dazu, daß die Dichtewerte zur Kippenbasis hin grundsätzlich zunehmen. Nachstehende Zusammenstellung zu Oberem, Mittlerem und Unterem Kippenstockwerk folgen der überwiegend festgestellten Dreiteilung des Teufenprofils der *Dichte* (die oft gleichsinnig verlaufende *Lagerungsdichte* ist abweichend definiert).

Oberes Kippenstockwerk - Durch die Art des Masseneinbaus (unverdichtete Schüttung) und geringe auflagernde Last, ist dieses Kippenstockwerk *lockerer gelagert* (angezeigt in der geringen Dichte), unabhängig von der Korngrößenverteilung. Sobald dieser Teil der Kippe durch den ansteigenden Grundwasser-Spiegel bzw. den vorseilenden Kapillarsaum (Unterdruck) erreicht wird, ist infolge Sackung die Zunahme von Lagerungsdichte und Dichte zu erwarten. Nunmehr in Abhängigkeit von der Korngrößenverteilung werden besonders *ungleichförmige Abraummischungen* maximale Sackung erfahren. Der *ausgeprägte Dichterückgang* (*entsprechend Porositätszunahme*) zur Kippenoberfläche spricht gegen einen nennenswert Sackung verursachenden Einfluß des versickernden Niederschlagswassers.

Aus den Angaben von Lange 1974 lassen sich für die obersten 3,8 m Kippe Seese-West mit kohligem Sand ein mittlerer *Rohdichte*-Wert von 1,525 g cm⁻³ ermitteln. Die für Seese-Ost aus den RHOR-Werten jeweils der obersten 5m-Probe (von 7 Bohrungen verwendbar) errechneten Rohdichten ($RHO = RHOR - 0,2$ Prinz 1997) betragen im Durchschnitt 1,546 gcm⁻³, in Meuro (von 4 Bohrungen verwendbar) 1,380 gcm⁻³.

Lindner et al. 1982 beobachtet mit der Aussagetiefe von 4 m einen „allmählichen Dichteanstieg zu einem höher konsolidierten Bereich in mittlerer Kippentiefe“. Für den

Teufenbereich 0 bis 3 m unter Oberfläche der Absetzerkippe Gräbendorf geben Wichter & Kügler 2000 „lockere bis sehr lockere“ Lagerung an. Unabhängig von der petrographischen Zusammensetzung (Korngrößenverteilung) sind die von Matschak 1969c untersuchten Abraumschüttungen „locker bis sehr locker“ bis in *14 m Tiefe*. Bis *20 m Kippentiefe* sind nach Förster et al. 1989 die Sedimente „locker bis mitteldicht“ gelagert und, abhängig von der Korngrößenverteilung unterschiedlich *verflüssigungsgefährdet*.

Mittleres Kippenstockwerk – Infolge der Eigenlast des hangenden Teils der Abraumschüttungsfolge werden relativ hohe Dichtewerte erreicht. Der *Beitrag dieses mächtigen Kippenabschnitts zur Gesamtsetzung* infolge Grundwasserwiederanstieg ist vor diesem Hintergrund zu relativieren.

Im Mittel 1,87 gcm⁻³ (Rohdichte) geben Zwingmann & Wein 1989 für „eine AFB-Kippe im Raum Lauchhammer“ an. Im von Matschak 1969c untersuchten Kippenprofil ist *unterhalb 14 m* die mit zunehmender Tiefe „erwartete dichtere Lagerung nur noch in geringem Umfang nachweisbar“ ist. *Unterhalb 20 m* finden Gehrisch et al. 1989 „keine große Veränderung“ der Rohwichte-Werte mit der Tiefe.

Die Abraumschüttungsfolgen Tagebau Seese-Ost und Tagebau Meuro zeigen in einigen Schüttungsbereichen eine *Zunahme der Dichte auch unterhalb von 20 m*. Dies wird wahrscheinlich durch den in diesem Kippenstockwerk wirksamen Einfluß der Korngrößenverteilung (grobkörnig, ungleichförmig) auf die Kompaktion der Schüttung, verursacht. Während im Oberen Kippenstockwerk, unabhängig von der Korngrößenverteilung, die Dichte teufenwärts zunimmt, wird der *Einfluß der Körnung* im zentralen Kippenvertikalabschnitt etwa beim Vergleich der Schüttungen, Bohrung ST3 (grobkörnig, Median 0,46 mm, RHOR 2,0 gcm⁻³) und ST8 (feinkörnig, Median 0,19 mm, RHOR 1,69 gcm⁻³) deutlich.

Unteres Kippenstockwerk - Überwiegend nimmt die Dichte zur Basis ab. Die Korngrößenverteilungscharakteristik der Vorkippenschüttmassen – ausgesucht feinkornarme Kiese und Sande (die entsprechend dem *verfügbaren* Deckgebirgesediment i.d.R. *gleichförmig* sind) und die Auflast der gesamten Schüttungsfolge sprechen dafür, daß die Partikel in dichtest möglicher Packung liegen, „lagerungsdicht“ sind. Demzufolge ist zu erwarten, daß sie nicht weiter verdichtet werden können und beim Grundwasserwiederanstieg allenfalls geringe Sackung erfahren.

Wichter & Kügler 2000 fanden in der Kippe Gräbendorf mit Kippenwasserstand bei ca. 50 % der Kippenmächtigkeit „nur geringe Sackung“ in diesem unteren Kippenabschnitt und

führten dies auf die relativ hohe Lagerungsdichte in größerer Kippentiefe zurück. Zu berücksichtigen ist der *Kornformeinfluß* auf die Packung der Partikel. So besteht für eckige Körner meist noch Potential zur Einregelung in eine dichtere Packung.

„Böden“ mit teilweise *tiefenwärts abnehmender Dichte* und demzufolge nicht anwendbarer Refraktionsseismik, fand Schöne 1967, cit. in Bilz 1971.

Die *Vorkippe* bildet die Standfläche für den Gleisrost der Förderbrückenhaldenstütze. Um Tragfähigkeit/Standfestigkeit und Frostsicherheit zu erreichen, wird eine kapillarbrechende Kiesschicht an ihrer Oberfläche aufgebracht. Durch den *Lasteintrag* über die Haldenstütze und dynamische Last von Hilfsgeräten auf dieser Arbeitsebene entsteht bis zu einer bestimmten Tiefe erhöhte *Lagerungsdichte*, max. 1,5 m, Hallbauer 1981. Dieser Lagerungsdichteanstieg läßt sich als „Peak“ in Drucksondierprofilen feststellen, Förster et al. 1989. Wegen der insgesamt relativ porösen Vorkippe ist das zu erwartende Dichte-Minimum (Kiesschicht) in den Bohrlochmessungen (GG-BLM) nicht erkennbar ausgebildet.

5.5.2 Porosität

Hinsichtlich der Vorgänge beim Grundwasserwiederanstieg und Strömung von Grundwasser durch die Abraumschüttungskörper hat die Porosität nicht analog dem „entwässerbaren Porenvolumen“ bei der Kippentrockenhaltung (Sümpfung) zur Gewährleistung der Tagebausicherheit (Standicherheit Kippenböschungen) die umgekehrte Bedeutung als „bewässerbares Porenvolumen“ dieses Körpers, Winkler 1984. Für die Abraumschüttung ist die *lockere Lagerung* charakteristisch. Somit ist bei der Verwendung der dort ermittelten Porosität für Aussagen zum *künftigen Hohlraumanteil* zu beachten, daß diese Porosität spätestens infolge Korngefügeeinregelung beim Wiederanstieg des Grundwassers vermindert wird.

Der *Hohlraumanteil*, der an der lockeren Abraumschüttung Seese-Ost und Meuro ermittelt wurde, wirkt sich auf darin stattfindende Vorgänge und Eigenschaften sowie deren Änderungen bei Wiederanstieg und Durchstrom des Grundwassers aus.

- *Sackung* infolge Grundwasserwiederanstieg, besonders im Hinblick auf *flurnahe Grundwasser-Spiegel-Endstände* in den Kippen. Wie bei der Behandlung des Einflusses der Korngrößenverteilung auf die Dichte gezeigt, sind zutreffende Aussagen über diese Verminderung der Porosität (das Sackungspotential) nur zusammen mit der Korngrößenverteilung möglich.
 - Festigkeit-, Tragfähigkeit der Kippenoberfläche.
-

- Bereiche mit relativ zur übrigen Schüttung höherer Porosität, in denen sich Mineralneubildungen als *Porenraumzement* abscheiden können und damit – zum Teil in Umkehr des Zustands bei der Schüttung - auch dessen *künftige Durchflußeigenschaft* bestimmen.

Reichel 1999 kommt mit *Setzungsmessungen* an locker lagernden Abraumschüttungen zu der Feststellung, daß diese dichtere Endlagerungszustände erreichen können, als das der Schüttung zugrundeliegende natürlich abgelagerte Lockergestein mit gleicher Korngrößenverteilungs- und Kornformcharakteristik. Er führt diese, die „Reproduktion ehemaliger Lagerungsverhältnisse“ noch übertreffende Dichteerhöhung, Bilz 1971 auf die Bewegungsspielräume der locker lagernden Sedimentpartikel hinein in *Makroporen* der Abraumschüttungskörper zurück. Die Bewegungsfreiheit zur Korneinregelung wird auch für das Setzungs- bzw. Sackungsverhalten beim Grundwasserwiederanstieg wirksam.

Von dem *erhöhten Setzungsmaß durch Makroporen* ausgenommen sind Lockergesteine mit geringer Ungleichförmigkeitszahl (z.B. Schüttmassen für die Vorkippe) und/oder erhöhtem Feinkornanteil (> 20 Gew.-%), Reichel 1999.

Den Zusammenhang zwischen der Dichte bei vollständig wassergefülltem Porenraum *RHOR* und der Porosität bzw. *Porenzahl n* geben Gl. (1) und Gl. (2) wieder.

$$RHOR = n \cdot RHOW + (1-n) \cdot RHOMatrix \quad (1)$$

$$n = \frac{RHOMatrix - RHOR}{RHOMatrix - RHOW} : 100 \quad (2)$$

RHOMatrix – durchschn. Dichte der Kornmatrix der kohlehaltigen Abraumschüttung	2,585 gcm-3
RHOW	1,000 gcm-3

Für den in den Abraumschüttungsfolgen *beobachteten Tiefenverlauf* der Porosität gelten die Überlegungen wie in „5.5.1.4 Merkmale der vertikalen Dichteänderung“.

5.5.2.1 Die Porosität im Abraumschüttungskörper Seese-Ost

(Anlagenheft). Die Angaben für die Bohrungen ST3, ST7, ST10 und ST15 setzen wegen Teilwassersättigung bei der zugrundeliegenden Dichtemessung erst entsprechend tiefer ein. Die ermittelten Porenzahlen reichen von $\sim 0,35$ bis $\sim 0,63$. Am häufigsten treten Abraumschüttungsbereiche mit Porenzahlen *zwischen 0,40 bis 0,50* auf.

Die *niedrigsten Porenzahlen* in den verschiedenen Kippenbereichen sind überwiegend in einem relativ mächtigen zentralen Teufenabschnitt der Schüttungsfolge anzutreffen. Innerhalb dieser bis 25 m starken Abschnitte bleibt die Porenzahl relativ konstant und liegt für die Schüttung im D.P.-Bereich, PS (2) – (2) (N – S) zwischen *0,44 und 0,47*. Im „Mittleren Strossendrittel“ zwischen D.P. und Schwenkende des Tagebaus gehen im mächtigen zentralen Teufenabschnitt die Porenzahlen auf *0,35 bis 0,40* zurück, PS (4) – (4) (N – S).

Auch im Kippenbereich Bohrung ST3, PS (4) – (4) (N – S), zeigt der dargestellte mittlere und untere Teufenbereich die für alle Schüttungsbereiche charakteristische *Porositätszunahme zur Kippenbasis* im unteren Kippenteil.

Die *Abraumschüttung, Bohrung ST8* im mittleren Strossendrittel weicht mit einem zentralen höherporösen Abschnitt von der in der übrigen Schüttung beobachteten Dreiteilung im Teufenverlauf ab. Dazu insgesamt vergleichsweise *höhere Porenzahlwerte*. Mit dem bei dieser Bohrung/Abraumschüttungsbereich geringen Feinkornanteil allein kann dies nur zum Teil erklärt werden, da die Schüttung im D.P. Bereich noch feinkornanteilärmer ist, aber nicht derart hohe Porenzahlwerte aufweist.

Eine hangendwärts abnehmende Porosität der Vorkippenschüttung (rollige, feinkornarme Deckgebirgsanteile) zum Hauptschüttungskörper ist im gesamten untersuchten Abraumschüttungskörper erkennbar. *Anstehender* Liegendschluff (mit der vergleichsweise höheren Lagerungsdichte der *natürlichen Ablagerung*) erbohrt mit den Bohrungen SS5, SS9 und ST7 führt zu den geringen Porositätswerten der jeweiligen Kippenbasisprobe.

Zunehmende Porosität, vom minimal porösen zentralen Teufenabschnitt zur Kippenoberfläche ist ebenfalls Merkmal der Schüttung im gesamten Kippenkörper Seese-Ost. Für den in der Abraumschüttung Seese-Ost festgestellten Teufenverlauf der Porosität mit der charakteristischen *vertikalen Dreiteilung* gilt analog zur Dichte die Aufstellung in 5.5.1.2.

5.5.2.2 Die Porosität im Abraumschüttungskörper Meuro

(Anlagenheft). Zu Teufenbereichen ohne Porositätsmessung siehe S. 108 (Dichtemessung). Die Porenzahlen reichen von $\sim 0,20$ bis $\sim 0,80$. Minimale Porenzahlen werden in einem zentralen Teufenabschnitt erreicht, PS (4) – (4) (S – N), Bohrungen MT5, MS9, MS14. Im südlichen Kippenbereich mit der *ältesten Schüttung* des untersuchten Teilfeldes Großräschen, Jahresscheibe 1989 gehen die Porenzahlen auf Werte *unter 0,20* zurück, vgl. PS (10) – (10) (SW – NE), Bohrungen MT1 und MT5.

Im PS (5) – (5) (NW – SE) wird mit Schüttung, Bohrung MS11 der zweite charakteristische Teufenverlauf der Porosität deutlich. Hier ist in der Tendenz eine von der Kippenoberfläche bis zur Kippenbasis *abnehmende Porosität* festzustellen. Noch ausgeprägter ist dieser Porositäts-Tiefenverlauf im PS (6) – (6) (S – N), Bohrung MS7.

Die *für alle Schüttungen* im Kippenoberteil in Seese-Ost und Meuro geltende *Porositätszunahme zur Kippenoberfläche* erreicht in Bohrung MS7 nahezu die höchsten festgestellten Porenzahlen, $\sim 0,75$. Hohe Porositätswerte treten außerdem für einen 10 m mächtigen Abschnitt, Schüttung Bohrung MT8 im äußersten Osten, Schwenkende Tagebau Meuro auf, vgl. PS (12) – (12) (W – E). Die relativ hohe Porosität im zentralen Teufenabschnitt, für den geringe Porositäten zu erwarten sind (DENSITY Log (GG) setzt erst unterhalb 13,7 m unter Kippenoberfläche ein), wird durch *hohe Kohleanteile* und entsprechend verminderte Rohdichte hervorgerufen.

Unabhängig vom Einfluß der petrographischen Zusammensetzung ist der *Porenzahlanstieg zur Kippenoberfläche* auf Werte *über 0,6* in den Bohrungen mit auch im Kippenoberteil erfolgter GG-Messung (MS3, MS7, MS9, MS11, MS14) festzustellen. Eine Porositätszunahme zur Basis ist nach Verlauf und Porositätswert für die Bohrungen MS9, MT10, MT13 und MS14 wahrscheinlich.

5.5.3 Porosität zur Ermittlung der Durchlässigkeit ?

In vorliegender Arbeit wurden die *kf*-Werte aus *Parametern der Korngrößenverteilung* ermittelt. Dies empfiehlt sich für die *locker lagernden Abraumschüttungsmassen* in den Kippenkörpern, da so die Aussage zur Durchlässigkeit für Wasser auch *nach* der vom Wiederaufgang des Grundwassers erfolgten Hohlraumreduzierung möglich ist. Eine für diesen künftigen Zeitraum *überhöhte Durchlässigkeit* wie aus der *aktuellen Porosität* wird so vermieden.

Über empirische Beziehungen zwischen Durchlässigkeit und Porosität ist im Prinzip denkbar, die Durchlässigkeitsbeiwerte der untersuchten AFB-Innenkippenmassive aus der Porosität zu ermitteln.

Für den Zusammenhang zwischen Durchlässigkeit und Porosität gilt, daß hohe Durchlässigkeit auch hohe Porosität bedeutet, hohe Porosität aber nicht den Schluß auf hohe Durchlässigkeit zuläßt. Mit formationsmäßig und regional begrenzter Gültigkeit wurde eine Reihe von Beziehungen „ n bzw. n_{eff} in Abhängigkeit von k_f “ aufgestellt. Marotz 1968 cit. in Mattheß & Ubell 1983, Hennig cit. in Winkler 1984, Helmbold cit. in Reichel et al. 1989, nach Johnson 1967 und Klein 1954 (beide cit. in Entenmann 1992). Die Mehrdeutigkeit läßt den Umkehrschluß, also eine Relation „ k_f in Abhängigkeit von n bzw. n_{eff} “, nicht zu.

5.5.4 Lagerungsdichte

Folgende Vorgänge führen dazu, daß die Kornlagerungs- und somit Festigkeitsverhältnisse der Abraumschüttungen in den Kippenkörpern *veränderlich* sind:

- Zeitsetzung, z.B. Dorschner
- tiefenabhängige Kompaktion,
- Festigkeitszunahme durch Feinkorn um Partikelkontakte und
- Sackung durch Korneinregelung infolge Grundwasserwiederanstieg.

Die *Lagerungsdichte* muß bekannt sein bei der Beurteilung:

- des *Setzungsmasses*, Innenkippenflächen,
- der *Verflüssigungsgefährdung*, Kippenböschung zu Restlochseen,
- des *Verdichtungserfolgs* von zur Begegnung dieser Verflüssigungsgefahr, z.B. mit Rütteldruckverdichtung angelegter „Versteckter Dämme“ (Stein 1984),
- der Festigkeit/Tragfähigkeit für die Haldenstütze der Abraumförderbrücke und der Kippenoberfläche entsprechend vorgesehener Nutzung.

Der infolge geringen Feinkornanteils allenfalls *schwach kohäsive Kornverband* der tertiären und quartären Lockergesteine der Niederlausitz wird bei der Abgrabung mechanisch aufgelöst. Ebenfalls Kornverbindungen durch frühdiagenetische Abscheidungen im zwischengranularen Porenraum (z.B. Eisen- und Karbonatkrusten), die zu einer bestimmten Festigkeit dieser Ablagerungen beitragen. Die Partikel bzw. Agglomerate der Abraummischung erreichen bei der Schüttung auf die Kippe eine bestimmte *Dichte der*

Lagerung, Packungsdichte. Die *Einregelung* der Partikel in eine der Korn- bzw. Agglomeratgrößenverteilung und Kornform entsprechende *optimal dichte Packung* wird überlagert durch die Entmischung/Anreicherung nach Korngröße und/oder Material in Schüttungsschichten auf den Böschungen der Schüttungsrippen als „längsgestreckte Haufwerke“, erzeugt durch die Fahrt der Abraumförderbrücke. Im Vergleich zu *natürlich abgelagerten Sedimenten* oder Spülkippen (Kluge 1980, Förster et al. 1991), wo Einregelung, unterstützt durch das sedimenttransportierende Wasser zu häufig maximal möglicher Kornpackungsdichte, d.h. Lagerungsdichte führen, wird bei der Schüttung der bergfeuchten Abraummischung nur eine lockere Lagerung erreicht.

Kennzeichnender Parameter der Bodenmechanik ist die *Lagerungsdichte* D . Diese wird zur Berechnung der *Tragfähigkeit* nichtbindiger Lockergesteine bestimmt. Beim Verfahren nach DIN 18 126 für nichtbindige Böden wird die an *ungestörter Probe* bestimmte natürliche Lagerungsdichte (Porenanteil n in natürlicher Lagerung) zu den Extremwerten bei lockerster (n_{\max}) und dichtester (n_{\min}) Lagerung in Beziehung gesetzt, $D = (n_{\max} - n) / (n_{\max} - n_{\min})$. Der Wert D gibt an, welchen *Grad an Partikeleinregelung* das Sediment bei seiner Ablagerung im Bereich zwischen der maximal dichten und der lockersten Lagerung erreicht hat, die Raumausnutzung durch die Partikel.

Die aufwendige Methode – beginnend mit der Gewinnung *ungestörter* Proben - zur Bestimmung des Tiefenprofils der Lagerungsdichte eines Lockergesteinskörpers wird in der bodenmechanischen Praxis durch *Sondierungen* (z.B. Rammsondier-, Drucksondiertechnik) ersetzt, wobei die ermittelte Schlagzahl bzw. der gemessene Spitzendruck aufgrund empirischer Beziehungen in Werte Lagerungsdichte umgerechnet wird, z.B. nach Turski 1995. Die *Lagerungsdichte* wird durch Eigenschaften der Partikel bzw. Partikelgemeinschaft beeinflusst:

- Korngrößenverteilung,
- Schüttungsvorgang (mögliche Entmischung),
- Kornform (bei gleicher Korngrößenverteilung unterschiedliche Lagerungsdichte möglich) und
- die Mächtigkeit der auflagernden Gesteinssäule.

So erreichen allgemein Sedimente mit höherer *Ungleichförmigkeitszahl* U höhere Lagerungsdichte. *Gröberkörnige Sande* erreichen wegen geringerer Zahl der Kornkontakte (geringerer Reibungswiderstand bei der Einregelung zur maximal dichten Packung) höhere Lagerungsdichten. Für die richtige Einschätzung von Lagerungsdichte-Angaben aus

Sondierungen in Kippen ist zu beachten, daß sich in den *trocknenden Kippen* um die Partikel verfestigend Feinkorn anlagern kann, Bernatzik 1947. Dies führt zu einer *höheren Lagerungsdichte/Festigkeit*, als sie nach dem Grad der Korneinregelung besteht, z.B. 1,5-fach nach Wichter & Kügler 2000, Kippe Gräbendorf. Das wiederansteigende Grundwasser schwemmt das Feinkorn heraus und führt zur Aufhebung der Festigkeit.

5.6 In Abbaurichtung geneigte Wechselschichtung

Merkmal aus Schüttungszusammensetzung, Schüttungsorientierung im Raum sowie Wiederholung (vertikal und lateral) in den AFB-Innenkippen.

Im kontinuierlich messenden GR-Log, das zur Anzeige des Feinkornanteils genutzt wird, fallen für die Abraumschüttungsfolgen in den AFB-Innenkippen Seese-Ost und Meuro häufige *Wechsel* des Anteils der „rolligen“ (Sand – Kies) und „bindigen“ (Schluff – Ton) Komponente auf.

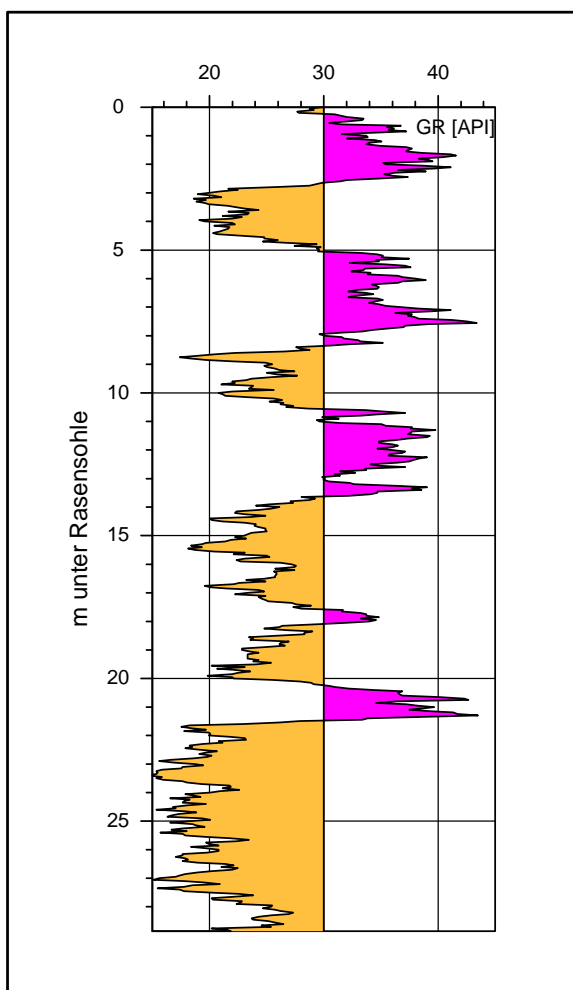


Abbildung 5-5 Beispiel einer „rollig – bindig“ Wechsellagerung im GAMMA-Log, Bohrung ST10, AFB-Innenkippe Seese-Ost, rollig < 30API, bindig > 30API.

Das in den Aufschlüssen der AFB-Kippenbohrungen registrierte Merkmal *Wechselschichtung* ist Ausdruck der unterschiedlichen *Abraumzusammensetzung* und der bei Abgrabung, Transport und der Verkipfung auf die *fortschreitend neu entstehende Kippenböschung* wirkenden Faktoren. Im Folgenden wird auf das kombinierte Struktur- und Schichtungsmerkmal eingegangen.

1.) Beschreibung des Merkmals

Kriterien der Wechselschichtung sind die *Mächtigkeit* der Schichten, *Art der vertikalen Änderung der Zusammensetzung* sowie die *Orientierung im Raum* der AFB-Kippe.

Die Mächtigkeit der Schichten beträgt überwiegend zwischen 2 und 7 m. Dazu infolge Entmischung auf der Kippenböschung auch in Mächtigkeiten von cm, dm. Die Änderung der Schüttungszusammensetzung erfolgt innerhalb einer Schicht nach den Mustern „nach oben abnehmender Feinkornanteil (*gröber werdend*)“, „nach oben zunehmender Feinkornanteil (*feiner werdend*)“ und „*symmetrische Entwicklung* zu einem Feinkornmaximum bzw. – Minimum in Schichtmitte“.

Verbunden mit der *Korngrößen- bzw. Materialänderung* ist die *Lageeigenschaft (räumliche Orientierung)* der Wechselschichten in den Kippenkörpern. Gehrisch et al. 1989 geben für rolliges Sediment 30 bis 35° Böschungsneigung an. Angaben flacherer Böschungswinkel, z.B. 20 bis 30° im Tagebau Welzow-Süd, Buczko 1999 sind wahrscheinlich darauf zurückzuführen, daß die Beobachtungs-Ebene *schräg zur Strossenrichtung* lag und nicht orthogonal, wie zur Angabe des *wahren Böschungswinkels* erforderlich.

Schüttungsbereiche der AFB-Innenkippen, in denen die Wechsellagerung bzw. Gradierung der Schüttungsschichten nicht bzw. schwach ausgeprägt auftritt, sind *Vorkippe* und *Drehpunktbereich*.

2.) Ursachen der Materialwechsel in der vertikalen Schüttungsfolge

Abnehmend *mächtigkeitswirksam* sind die Ursachen für den Wechsel der Zusammensetzung in der Abraumschüttungsfolge: Vorkippenschüttung, Rücken des Förderbrückenverbandes, Wechsel von Hoch- zu Tiefschnitt, Durch Fächerschnitt entstehende Spanfolge, Entmischungsvorgänge.

Bedingt durch die Fahrweise des Förderbrückenverbandes in Strossenrichtung treten – abgesehen von der Vorkippenschüttung – die entstehenden Vertikalabschnitte der

Schüttungsfolgen (nach Mächtigkeit und Zusammensetzung bzw. deren Änderung) *in mehrfacher Wiederholung* z.B. in einer Bohrung auf.

Vorkippenschüttung – Zur Gewährleistung von Standsicherheit und Tragfähigkeit für Großgeräte einschließlich der AFB-Haldenstütze muß die in die Vorkippe geschüttete Abraummischung feinkornarm sein (Anteil $< 0,063$ mm unter 15 %). Entsprechend der Schüttung dominierend „rolligen“ Abraums treten in dieser Kippscheibe kaum Wechschelschichten auf. Sofern bindiges Material in die Vorkippenschüttung gelangt, wird es stets an deren Basis verkippt. Die Oberfläche der Vorkippe, Arbeitsebene (Gleisrost des Haldenfahrwerks) ist i.d.R. als Kiesschicht geschüttet.

Rücken des Förderbrückenverbandes – Nach Erreichen der maximalen Auslage der abraumfördernden Eimerkettenbagger in den Abraumschnitten erfolgt das Rücken des gesamten AFB-Verbandes in Abbaurichtung. In der Mächtigkeit von der Weite des Rückintervalls abhängig, entstehen *Schüttungsrippen*, (siehe Abschnitt „Technogener Faktor – Abgrabung und Verkipfung des Deckgebirges mit Abraumförderbrücken (AFB) zur Freilegung des Braunkohlenflözes“) welche jeweils die Abraummassen der verschieden zusammengesetzten Abraumschnitte (i.d.R. des Hoch- und Tiefschnitts) enthalten.

Wechsel von Hoch- zu Tiefschnitt – Innerhalb eines Rückstadiums bedingt der *Wechsel* vom regulär zuerst erfolgenden Hochschnitt und Verkipfung von dessen Abraummassen zum Tiefschnitt die Änderung der Zusammensetzung der geschütteten Abraummischung. Entsprechend verursacht der ebenfalls mögliche *Wechsel* vom Tiefschnitt zum Hochschnitt die Änderung der Abraummischung.

Durch Fächerschnitt entstehende Spanfolge – Beim *Hochschnitt* erfolgt zunächst die Mischung des Abraums aus der *gesamten* Schichtenfolge des Deckgebirges.

Durch die Absenkung der Eimerkette in die Deckgebirgsfolge hinein nimmt kontinuierlich der Anteil der beim Schnitt erfassten hangenden Schichten ab und derjenige der liegenden Schichten zu.

Beim *Tiefschnitt* erfaßt die am Beginn horizontal angeordnete Eimerkette zunächst ausschließlich die *hangende Schicht* (z.B. Tiefschnittanschnitt der „G400-Sande“), dementsprechend wird Abraum dieser Zusammensetzung verkippt und erst mit Erreichen der Winkelstellung wird eine *Mischung aus sämtlichen Schichten* dieses Abraumschnitts abgebaggert und verkippt.

Das Deckgebirge der untersuchten Tagebaue ist zum einen aus sandig-kiesigen Sedimenten zusammengesetzt. Ursache der Wechschelschichtung ist im Falle der AFB-Kippe

Meuro vor allem der mächtige *tertiäre Hangendschluff* als bindige Abraumkomponente, im Falle Seese-Ost der *pleistozäne Geschiebemergel*.

Entmischungsvorgänge – Durch Abgrabung und Transport entsteht aus der Deckgebirgsschichtenfolge eine *Abraummischung*. Bei der Schüttung dieser Mischung auf die Flanke der vorangehenden Schüttungsrippe kommt es zu *Entmischungsvorgängen*. Die Klassierung und Sortierung *nach Materialzusammensetzung bzw. -Eigenschaften* des verkippten Abraums, d.h. Größe, Dichte und Form (Rollfähigkeit) der Abraumsedimentpartikel bzw. -aggregate aus Quarzsand, Schluff-Ton und Kohle findet überwiegend *gravitativ entlang der schiefen Ebene* der in Abbaurichtung geneigten Kippenböschungsflanke statt. Matschak 1969 beschreibt diese Vorgänge als Verteilung der Fraktionen durch Abrollen und Abgleiten auf der Böschungsoberfläche infolge von Entmischung, Umlagerung (Rutschungen) und Anlagerung im Hinblick auf die *Rohdichteverteilung* in Kippenkörpern. Geschiebe sowie Ton- bzw. feinkornreiche Aggregate („Klumpen“) gelangen als „rollige“ Komponenten häufig an die jeweilige Böschungsbasis einer Kippscheibe, Leibiger 1964. Dazu kommt das „kinetische Verhalten der Fraktionen“ *im Aufschlagbereich* der Abraummassen, Matschak 1969. Danach verbleibt dort vorzugsweise das Grobkorn der Abraummischung.

Mit der *gravitativen Transportsonderung* entlang der schiefen Ebene der Kippenböschungen unterhalb des Aufschlagpunktes verbunden wird weiterhin auch eine *Einregelung* von plattigen bzw. länglichen Partikeln erfolgen.

Die Phänomene der Entmischung sind vor allem auf den *cm-Bereich* konzentriert. Beim Rollen von Geschieben bzw. Ton-Schluffklumpen (Aggregate) jeweils an den Hangfuß einer Kippscheibenböschung werden Einheiten von *dm-Mächtigkeit* erreicht.

3.) Wirkungen der geneigten Wechschelichtung im Zusammenhang mit dem wiederaufgehenden Grundwasser und der Grundwasserströmung

Raumlage und Zusammensetzung der unterschiedlich mächtigen Einheiten (Schüttungsschicht, Schüttungsrippe) bzw. Grenzflächen wirken auf die *bodenmechanische Stabilität*, die *Wasserdurchlässigkeitseigenschaften* und die *Reaktionsbedingungen (Sediment – Wasser)* des Innenkippenkörpers.

Bodenmechanische Stabilität – Wechselnd „rollig“ und „bindig“ zusammengesetzte Einheiten der Schüttungsfolge begünstigen das Auftreten von *innerer Erosion*, v.a. Kontaktsuffosion an Übergängen zwischen durchlässigen Grob- und vergleichsweise geringerdurchlässigen Feinkorn-Lagen, mögliches Initial für Setzungsfließen.

Die *Grenzflächen* petrographisch unterschiedlich zusammengesetzter Schüttungseinheiten (Schichtgrenzen) bedeuten in den Schüttungsfolgen Diskontinuitäten z.B. der Lagerungs-/Dichte und sind *Ablösebahnen für Rutschungen* von Abraummassen auch im Kippeninneren mit den darin enthaltenen ehemaligen Kippenböschungen. Dies legt die Beobachtung von Fuchs & Schüler 1997 nahe, die eine Häufung von Rutschungsereignissen im Kontaktbereich technologiebedingt zweier Abraumschüttungsmassen feststellten. Diese Flächen entstehen beim Betrieb eines Tagebaus mit z.B. zwei Drehpunkten wie dem von ihnen untersuchten ehemaligen Tagebau Niemtsch (mit Insel im heutigen Senftenberger See).

Wasserdurchlässigkeitseigenschaften – Infolge der in Abbaurichtung geneigten Schüttungsschichtung liegen in den Kippenkörpern in wiederholtem Wechsel *unterschiedlich durchlässige Schichten nebeneinander*. Bei Untersuchungen zur *Standicherheit* von AFB-Kippenböschungen während des Grundwasseraufstiegs fanden Heimbold et al. 1968 in Bohrungen AFB-Kippe Tagebau Lochau abwechselnd *wasserführend* und nur *bergfeuchte* Schichten der AFB-Kippe. Zur Gewährleistung standsicherer Kippenböschungen für den Zeitraum bis zum Erreichen der vollständigen Sättigung aller Schichten (Grundwasserspiegelebene) schlugen sie *horizontale Entwässerungselemente parallel zur Strossenrichtung* vor. Gläßer & Christoph 2000 fanden „gut leitfähige *Kiesbereiche* von wenigen Dezimetern an den Förderkippenflanken, die die Kippen zeitweilig aus Quellen entwässerten.“

In der AFB-Innenkippe eines Tagebaus mit Schwenkbetrieb sind die Wechschel-schichtung und damit auch die gering durchlässigen Schüttungsschichten vergleichbar einem *aufgespannten Fächer im Raum* angeordnet. Eine *Beeinflussung des Wasserfließweges in lateraler Richtung* ist anzunehmen. Die geringe Durchlässigkeit bzw. Barrierewirkung der geneigt im AFB-Körper angeordneten wasserhemmenden bzw. –nichtleitenden Schichten wird durch *Partikeleinregelung* flächiger Aggregate in der Abraumschüttung noch *verstärkt*.

Reaktionsbedingungen (Sediment – Wasser) – Durch die geneigt angeordnete Wechschel-schichtung liegen in vielfacher Wiederholung in lateraler Richtung durch den Kippenkörper „rollige“ und „bindige“ Schichten auf gleichem Höhenniveau nebeneinander und es entstehen zahlreiche Grenzflächen unterschiedlich zusammengesetzten Abraums. Die bindigen Schichten enthalten im Falle ihrer Herkunft aus mächtigem Hangendschluff des Deckgebirges (Tagebau Meuro) die mit dem wiederaufgehenden Grundwasser reagierenden Sedimentbestandteile und Reaktionsprodukte aus der „Pyritoxidation“, die ins Kippenwasser aufgenommen werden und Folgereaktionen hervorrufen.

Durch die zahlreichen Übergänge von bevorzugt wasserzuführendem „Rolligem“ und den „Bindigem“ mit Reaktionskomponenten sind *günstige Voraussetzungen für die Reaktion* mit dem Grundwasser gegeben. Die durch die Anordnung und unterschiedliche Zusammensetzung der Schüttungsschichten erzeugte große *Reaktionsfläche* ist charakteristisches Merkmal für den „Reaktor“ AFB-Innenkippe.

Im Falle der „bindigen“ Einheiten aus *Geschiebemergel* werden die dort enthaltenen Karbonate *wirksam als Puffer* für das aufgehende saure Kippenwasser reagieren.

6 Stoffliche Eigenschaften der Abraummischungskörper

6.1 Die *petrographischen Komponenten der Abraummischung zur Kennzeichnung des „Reaktionskörpers Kippe“*

Als petrographische bzw. mineralische Bestandteile der Abraummischung werden in der Hauptsache

- Kohle, kohlige Substanz,
- FeS₂ – nicht oxidiertes Sulfid,
- Ton- und Glimmerminerale und
- Karbonat (Calcit)

an den hydrogeochemischen Reaktionen mit dem aufgehendem Grundwasser beteiligt sein. Grundlegenden Einfluß auf die Kippenwasserbeschaffenheit hat die *Oxidation von FeS₂*. Neben den in mehreren Reaktionsschritten erreichten *Endprodukt H₂SO₄* können Vorstufen, z.B. Schweflige Säure mit den organischen und mineralischen Bestandteilen der Abraummischung reagieren. Die *Komponenten der Abraummischung* stehen, zum Teil für mehrere der *Reaktionen* „Versauerung“, „Elementfreisetzung“, „Ionenaustausch-Pufferung“ und „Pufferung“ und treten in Kombination auf.

Wann im Laufe des Grundwasserwiederanstiegs *welcher Einfluß* aus diesen Reaktionen auf die Beschaffenheit des Kippenwassers und Restloch-Seewassers ausgeht, hängt von der *relativen Lage zueinander* der Komponenten der Abraummischung im Kippenkörper ab. Das bedeutet, daß man *die Kippenwasserentwicklung* aus den Konzentrationen der Reaktionskomponenten und deren räumlicher Verteilung ableiten muß, wie sie durch die *Geologische Kippenerkundung* bestimmt wird.

Zwischen den *Sedimentbestandteilen* der Abraummischung und den hauptsächlich hydrogeochemischen *Reaktionen* in den Kippenkörpern besteht ein Zusammenhang. Deutlich

wird dies an dem in der Kohle, kohligen Substanz vorkommenden *Sulfid* mit entsprechendem Versauerungspotential. Weitere Beispiele sind die *mit* der Kohle, kohligen Substanz vorkommenden Tonminerale, deren Al^{3+} unter Säureeinwirkung freigesetzt wird, der an den Tonmineraloberflächen austauschbar gebundene *Kationenbelag*, vor allem Ca^{2+} und schließlich der in der Kohle, kohligen Substanz feinstverteilt auftretende *Calcit*.

Diese Zusammenhänge werden genutzt, um das Szenario zum Anstieg des Grundwassers im Kippenkörper auf die wesentlichen Reaktionen zu *konzentrieren*. In einem weiteren Schritt werden als für diese Komponenten der im übrigen quarzsanddominierten Abraummischung stellvertretende Parameter *Gesamtkohlenstoff*, *Aluminium* und *Calcium* für Auswertung und Interpretation festgelegt. Aus der Verteilung dieser Parameter im Abraummischungskörper erfolgt der Schluß auf die Entwicklung der Kippenwasserbeschaffenheit beim Grundwasserwiederanstieg in die Kippe.

petrographische bzw. mineralische Komponente	hydrogeochemische Reaktionen	Parameter, stellvertretend für die Komponente
„Kohlekomponente“ (Kohle, kohlige Substanz – Ton/Schluff, mit kohligem Substanz verunreinigt)	Versauerung, Freisetzung mit Kohle vorkommender Stoffe	Gesamtkohlenstoff
„Tonkomponente“ (Ton- und Glimmerminerale)	Freisetzung von Al	Aluminium
„Kalkkomponente“ (Karbonat)	„echte“ Pufferung und Austauschpuffer (Kationenbelag der Tonminerale)	Calcium

Merkmale der Abraumsedimentkomponenten und ihrer Verteilung im Kippenkörper, die für die Vollständigkeit der Reaktionen mit dem wiederansteigenden Grundwassers wichtig sind:

- *Feinkörnigkeit* - reaktionsfördernde *große Oberfläche*,
- *Lagerungsverhältnisse*, d.h. Angrenzen an gut durchlässige, quarzsanddominierte Schüttungsschichten in der Wechsellagerungsfolge - *Erreichbarkeit* für Wasser
- versauerungswirksames Eisendisulfid und mobilisierbare Stoffe liegen *räumlich eng verbunden in der Kohle, kohligen Substanz* innerhalb der quarzsanddominierten Abraummischung vor. Besonders trifft dies für die Hangendschluffsedimente zu, die

infolge ihrer geologischen Entstehung aus der Flözoberfläche *feinst aufbereitete Kohlige Substanz* einschließlich reaktionsfähiger Bestandteile enthalten.

Das gemeinsame Auftreten z.B. von *Kohle, kohlige Substanz (sulfidhaltig) mit Ton- und Glimmermineralen* (Kippe Tagebau Meuro mit mächtigem Hangendschluff) oder *Karbonat und Tonmineralen* (Kippe Tagebau Seese-Ost mit hohem Geschiebemergelanteil) bildet als Zusammenhang zwischen stofflichem und textuellem Merkmal eine Grundlage für die Ableitung von Näherungswerten zu *Schwefel-* bzw. *Calcium*-Gehalten in mit Spülbohrungen/Bohrlochmessungen untersuchten Bereichen der Abraumschüttungen.

6.1.1 Korngrößenmerkmal und Elementgehalte

Generell sind in Sedimenten eine Reihe von chemischen Elementen in feinkörnigen Fraktionen *angereichert*. Dies ist auf die häufig in dieser Korngrößenfraktion konzentrierten adsorptions- und austauschwirksamen Bestandteile mit großer spezifischer Oberfläche, in der Regel *Schichtsilikate* und *organische Substanz* zurückzuführen. Dazu kommt die Feinkörnigkeit der z.B. in der Kohle enthaltenen Sulfide und Karbonate.

Dies trifft auch für die untersuchten Abraumsedimentmischungen zu, die petrographisch als „kohlig verunreinigte“ Sande mit wechselndem Feinkornanteil, der i.w. von Hangendschluff- und/oder Geschiebemergelsedimenten herrührt, zu kennzeichnen sind. Für in die Kippe überführte *Hangendschluff-Sedimente* des Flözdeckgebirges ist die Feinkörnigkeit bereits in der lithologischen Bezeichnung ausgewiesen. Böhme 1980 zufolge enthalten ~ 55 % der untersuchten Hangendschluff-Sedimente, Tagebau Meuro über 50 % Feinkorn (v.a. Schluffkorngröße) in dem die kohlige Substanz und die mit ihr auftretenden mineralischen Bestandteile konzentriert sind.

Bei der *kippengeologischen Erkundung* der Abraumschüttung wird mit Hilfe der bohrlochgeophysikalischen Messung der natürlichen Radioaktivität (GR-Log) und Kalibration an Bohrkernen das *Feinkornanteil-Profil* der Abraumschüttung auch für Spülbohrungen ermittelt. Bei bestehendem Zusammenhang zwischen *Feinkornanteil* und *Elementgehalt* im Sediment (Trockenkernbohrungen), sind Näherungsangaben von Elementgehalten für die Abraummischungen auch in Spülbohr-Positionen möglich und können für die Konstruktion der Isolinien der Elementgehalte in den Profilschnitten genutzt werden.

Die *Elementgehalte* der Abraummischung wurden gesondert für die *Feinkornfraktion* (< 0,063 mm) und die *Sandfraktion* (0,063 bis 2 mm) bestimmt und entsprechend dem

Fraktionsanteil zum Gehalt *Fraktion 0 bis 2 mm* hochgerechnet, die über 90 % der Abraumsedimentschüttung AFB–Innenkippen Seese-Ost und Meuro ausmacht. Die in Korngrößen bis über 63 mm auftretenden Bestandteile sind Geschiebe des pleistozänen Deckgebirges und holzige Bestandteile von Kohle. Für einige Spurenelemente lagen bei den eingesetzten Standard-Analysenverfahren Gehalte oberhalb der Bestimmungsgrenze ausschließlich in der *Feinkornfraktion* ($< 0,063\text{mm}$) vor.

6.2 „Kohlekomponente“ (Kohle, kohlige Substanz) – Gesamtkohlenstoff

An Kohliger Substanz reiches *Deckgebirge* und *Flöz-Teile* gelangen infolge der Technologie der Kohle- und Abraumgewinnung in die AFB-Innenkippe. Durch diese Einlagerung *kohliger Bestandteile* in der quarzsanddominierten Schüttung des Deckgebirgeabraums entstehen *neu Sedimentkörper* mit im Verhältnis zu natürlichen klastischen Ablagerungen erhöhtem Gehalt an organischer Substanz. Die für Kippenabschnitte um 25 m bestimmten Gehalte von *ca. 10 %* übertreffen um Größenordnungen selbst die für feinklastische Gesteine kennzeichnenden höheren Werte Corg. 0,5 % im Mittel für *Tongesteine* (Tissot & Welte 1978), $< 0,1 \%$ im Mittel für *Sand/Sandstein* (Pettijohn et al. 1973).

Beim Grundwasserwiederaufstieg wird die in von *sterilem Quarzsand* dominierter Abraumsedimentmischung verteilte *Kohle, kohlige Substanz* aufgrund der darin enthaltenen mineralischen Bestandteile für die Beschaffenheit des Grundwassers wirksam. Primär durch das Eisendisulfid und dessen Versauerungswirksamkeit infolge Oxidation. Zum anderen mobilisiert die entstehende *schweflige und schwefelsaure Lösung* die ebenfalls mit der Kohle, kohligen Substanz zusammen vorkommenden Stoffe.

6.2.1 Chemische Zusammensetzung der Braunkohle – Bedeutung für den Chemismus der Abraummischung

Als *Mineralstoffe* finden sich in den Braunkohlen stets *Aluminium-, Silizium-, Calcium- und Eisenverbindungen* neben solchen von *Magnesium, Kalium, Natrium*, meist auch von *Mangan*. Diese Elemente treten in Form von Silikaten, v.a. Schichtsilikaten, Karbonaten, Sulfiden, Chloriden, Phosphaten, Sulfaten und Humaten auf, Lissner & Schäfer 1956. Die *mineralische Substanz* in der Braunkohle ist überwiegend als klastischer Eintrag (Wasser, Wind) syngenetisch während der Flözbildung *von außen* in die Massen der kohlebildenden Pflanzen gelangt. Sie hat „tonigen Charakter“, reaktionsbegünstigende große Oberfläche und

ist *in der Kohle mikroskopisch fein- und feinstverteilt* („disseminated“) und somit Bestandteil auch der *kohligen Substanz* der Hangendschluffsedimente.

Darbinjan 1989 zufolge wurde der überwiegende Teil der Elemente außer den kohlebildenden (C, H, N, O) in der Kohle *syngenetisch*, kontrolliert durch die paläogeographische Position der Torfmoore im Sedimentationsraum, über Oberflächengewässer in die Torfmoore des späteren Lausitzer Braunkohlereviere eingetragen. Abhängig vom Elementangebot („*äußere Faktoren*“) und den geochemischen Milieubedingungen (v.a. pH, Eh) werden in den Torfen und Kohlen eingetragene Stoffe mobilisiert oder fixiert. Generell verarmen Braunkohlen im Laufe der Diagenese und mit den Moorwässern werden Na, P, K, Zn, Rb, Cu *ausgetragen*.

Dem Prinzip der geochemischen Barrieren von Perel'mann („*innere Faktoren*“) folgend, weist Darbinjan 1989 für die Niederlausitzer Braunkohlen folgende Faktoren der chemischen Zusammensetzung aus, d.h. im Zuge der Inkohlung werden in der Kohle fixiert:

- *Biochemische Barriere* (Bindung von Me-Ionen an Huminstoffe): S, Al, Fe, Ti, F, As, Se, Sc, Sb, Cd
- *Reduktionsbarriere* (neg. geladene Humuskolloide als Elektronen-Donatoren): Mo, U, V
vor allem in flözliegenden Bereichen, Kontaktzone zu Flöz
- *Schwefelwasserstoffbarriere*: Fe, Co, Ni
Unter reduzierenden Bedingungen und bakterieller Beteiligung wird H₂S erzeugt. Das organisch gebundene Eisen (kolloidal als Fe(OH)₃ in die Torfmoore gelangt, als Fe²⁺ beweglich und für Organismen verfügbar) und andere „chalkophile Elemente“ werden in die sulfidische Phase umverteilt. In den Kohlen des 1. LF, 2. LF und 3. LF wurden sporadisch, in denen des 4. LF häufiger hohe *Sulfidschwefelgehalte* und korrespondierend erhöhte Gehalte an *Fe, Co, Ni* angetroffen.
- *Mechanische Barriere*: Die Akkumulation von mit Oberflächengewässern eingetragenen detritischem Material (u.a. Ton) in Moor-Randbereichen, z.B. Ti.

Modifiziert wird die bei der Flözentstehung angelegte Elementeverteilung in der Kohle durch eine spätere, *epigenetische Zufuhr*, z.B. von Schwefel aus den Flöz-Nebengesteinen in die Kohleflöze.

Die *in der Abraummischung untersuchten chemischen Elemente* sind nach dem organischen und anorganischen Vorkommen bzw. Bindungsform in der *Kohle und kohligen Substanz* und nach *Häufigkeit* (HE, NE, SE) in Tabelle 6-1 zusammengestellt.

Braunkohle und Kohlige Substanz

kohlebildend	metallorganisch	in Silikaten v.a. Tonmineralen	in Sulfiden	in Karbonaten	in Sulfaten	
biophil	biophil	lithophil	chalkophil	lithophil	sekundär lithophil	
C		Al	S	Ca	S	H
S			Fe		Al	E
					Fe	
	Fe	Ti			Ca	N
	Ti					E
	Ca Mn	Mn	Co	Mn		
	Co		Ni	Zn		S
	Ni		Zn			E
			(Mn)			

Tabelle 6-1 Chemische Elemente, die zusammen mit der Kohle auftreten und ihre mögliche Bindungsform. Anordnung nach Häufigkeit: Hauptelement HE (>1 %), Nebenelement NE (100mg/kg bis 1%), Spurenelement SE (1 bis 100 mg/kg).

Die als Hauptelemente der Kohle aufgeführten Elemente *Aluminium* und *Calcium* treten in der *Abraummischung* neben der Bindung an die mineralische Substanz der Kohle, kohlige Substanz auch im *Geschiebemergel* auf.

Die Bindung von Elementen an die *organische Substanz der Braunkohle* wird im folgenden erläutert. Die Fähigkeit, metallorganisch im humussauen Kohlebildungsraum verfügbare Elemente an sich zu binden ist ein Charakteristikum der *Braunkohlen* und wegen der unterschiedlichen *Stabilität* gegenüber Lösungen und pH-Änderungen, wie sie durch die Entwicklung einer *schwefelsauren Lösung* zu erwarten sind, von Interesse. Mit höherer *Inkohlung* nimmt diese Elementbindungskapazität ab, Swaine 1990. Prinzipiell sind zu unterscheiden:

- *ionar austauschbar* an die Carboxylgruppen (- COOH), die Phenol Hydroxylgruppen (- OH), die „mercapto“-Gruppen (-SH), die Amino-Gruppen (-NH₂) und die „innino“-Gruppen (=NH, stabil bis in Steinkohle-Stadium) der Kohlesubstanz. Dieses „natürliche Kationenaustauschvermögen“ (Stach & Teichmüller 1953) betrifft v.a. Alkali- und Erdalkalimetallionen, z.B. tritt Ca als Salz der Carboxylsäure auf; die *Verbindungen sind lösbar*; mit zunehmendem Ionenpotential der Me-Ionen sind diese stärker an die organische Substanz der Kohle gebunden. Teilgehalte von Mn, Ba, Sr, Zn, Cu sind austauschbar in Braunkohlen enthalten, Swaine 1990.
- Humin- und Fulvosäuren bilden mit Kationen *Humate* (*quellfähig, reagieren kolloidchemisch*), *löslich*: K, Na, NH₄, *unlöslich*: Ca, Fe, Mg, Mn, Ba (daher in Asche angereichert, Lissner und Schäfer 1956).
- *Chelatisierung* von Metallionen (Zentralion) durch Gruppen der *Huminsäure* (Liganden). Die Stabilität dieser metallorganischen Komplex-Verbindungen steigt mit dem Ionenpotential. Besonders *unlöslich* sind kleine hochgeladene Ionen, die bevorzugt auf diese Weise mit organischer Substanz assoziiert sind.

Obwohl ein direkter Nachweis fehlt, ist es wahrscheinlich, daß “verschiedene Spurenelemente“ organisch, wahrscheinlich als Chelat-Komplex in Braunkohlen auftreten“, Swaine 1990. Für Braunkohlen mit *Aschegehalten unter 5 %* spielt die direkte Assoziation von Elementen mit der organischen Substanz der Kohle eine nennenswerte Rolle, Finkelman 1981.

Bei Kohle, kohliger Substanz der Hangendschluffe mit *mehr als 5 % Asche* wie für Kohle in den hier untersuchten Abraummischungen Seese-Ost, sind die reaktionsfähigen Elemente Finkelman 1981 zufolge überwiegend *mit den Mineralen* in der Kohle assoziiert.

Mit der Untersuchung der *Abhängigkeit der Elementkonzentration in der Asche vom Aschegehalt der Kohle* kommen Leutwein & Rösler 1956 zur Aussage, daß

- Ge, Be, Zr, Cr, (Cu) – fast ausschließlich an die *organische Substanz* der Kohle gebunden sind,
 - Ga, Co, V, (Sn), (B), (Li), (Ti) – in geringem Umfang an Kohlenstoffsanz, *überwiegend mineralisch* und
 - Mn, Sr, Ba, P, Sn, Zn – fast *ausschließlich mineralisch* gebunden sind.
-

However, „the question of how the elements originally become associated with the coal is a moot one“, Finkelman 1981. Given & Miller 1987 (cit. in Swaine 1990) konstatieren, „the one generalization that we feel is fully warranted is that the *organic matter* in a peat or lignite, has in many ways, a profound influence in determining *which inorganic matter, in what form,* it will associate with.“

Schröder 1992 faßt seine Literaturdurchsicht zu der „organischen Assoziation von Spurenelementen *in Steinkohlen*“ zusammen und führt aus, „daß die sogenannten Komplexstrukturen in der Kohle, zu denen metallorganische Verbindungen zählen, Spurenelemente binden können und damit zur Spurenelementführung in Kohlen beitragen. Er weist darauf hin, daß diese Aussage bei allen Autoren auf theoretischen Überlegungen basiert. „Da es praktisch nicht gelingt, die sogenannte Pflanzenasche aus der Kohle vollständig zu entfernen, ist ein direkter Nachweis über die Spurenelementführung organischer Verbindungen in der Kohle sehr schwer.“ Kautz et al. 1984 halten eine differenzierte Bestimmung der *Spurenelementanteile* hinsichtlich ihrer *ionogenen oder adsorptiven Bindung an die organische Grundsubstanz* von Kohlen für derzeit nicht möglich.

Untersuchungen an *Xylit*, einer vollkommen *mineralfreien Kohleform* („fossiles Holz“) können hier möglicherweise Klarheit schaffen.

Neben den Lagerungseigenschaften stellt die Abraumschüttung aus *gemischtem Deckgebirgesediment* auch hinsichtlich der chemischen Zusammensetzung eine *neue Lithologie* dar. Zum Vergleich sind für die wesentlichen *natürlichen Gesteine* die durchschnittlichen Gehalte der in der Abraummischung analysierten Elemente zusammengestellt, Tabelle 6-2.

	Granit	Basalt	Sedimentgestein	Sandstein	Tonstein	Kalkstein	Braunkohle	Braunkohlenasche
(0)	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)
HAUPTELEMENTE								
C	-	-	-	-/< 1.000 ^{A.)}	-/5.000 5.000 ^{C.)}	-	680.000 ^{D.)}	-
S	400/-	300/-	-	-/240	-/3.000	-/1.200	16.000	-
Fe	27.000/ 27.000	85.600/ 56.000	41.000	29.000/ 9.800	48.300/ 33.300	17.000/ 3.800	7.700	73.000
Al	77.000/-	87.600/-	-	-/25.000	-/104.500	-/4.200	9.000	98.000
Ca	15.800/-	67.200/-	-	-/39.100	-/25.300	-/302.300	22.000	86.000
NEBENELEMENTE								
Ti	2.300/-	9.000/-	-	-/1.500	-/4.500	-/400	500 (80-8.100)	2.600
Mn	600/-	2.000/-	-	-/250 ^{B.)}	-/670	-/1.100	100 (25-220)	510
SPURENELEMENTE (Gehalte oberhalb Nachweisgrenze RFA nur in Fraktion < 0,063 mm)								
Co 4, 12	5/1	45/35	14	0,3/0,3	19/ 20	0,1/0,1	3 (< 3-17)	20
Ni 6, 21	8/0,5	160/150	52	9/2	68/ 95	7/20	8 (4-28)	51
Zn 8, 28	60/52	130/100	95	30/16	95/ 80	20/20	18 ^{E.)}	100
(0)	untersuchtes Element		NG, BG – Nachweisgrenze, Bestimmungsgrenze					
(1)	Granit	Vinogradov 1962 in Rösler & Lange 1975 /			Taylor 1964			
(2)	Basalt	Vinogradov 1962 in Rösler & Lange 1975 /			Taylor 1964			
(3)	Sedimentgestein	Wedepohl 1969						
(4)	Sandstein	Wedepohl 1969 /			Turekian & Wedepohl 1961 in Mason & Moore 1985			
(5)	Tonstein	Wedepohl 1970 /			V. 1962 in R. & L. 1975 (Schiefer und Tone)			
(6)	Kalkstein	Wedepohl 1969 /			Turekian & Wedepohl 1961 in Rösler & Lange 1975			
(7)	Braunkohle (wf)	Darbinjan et al. 1987						
(8)	Braunkohlenasche	Darbinjan, zusammengestellt aus Judovic et al. 1985 und Rösler & Lange 1975 in Seim & Tischendorf 1990.						

A.) Sand/Sandstein, Pettijohn et al. 1973, B.) Sand/Sandstein, Clarke, n=253 in Wedepohl 1967, C.) Feinkörnige Sedimente, Tissot & Welte 1978, D.) Braunkohle (wf), NL Revier, Böhnisch in Nowel et al. 1994, E.) Darbinjan, zusammengestellt aus Judovic et al. 1985 und Rösler & Lange 1975 in Seim & Tischendorf 1990.

Braunkohle (7): Dem Analysenwert liegt jeweils eine Mischprobe gesamtes Flöz zugrunde; demzufolge sind hohe Werte, wie bekannt z.B. für Schwefel und Titan im obersten Abschnitt des 2. LF „weggemittelt“.

Braunkohlenasche (8): Den Angaben ist die Annahme eines mittleren Aschegehalts zugrundegelegt. Bei Vergleichen von Elementgehalten in der Asche verschiedener Proben ist auf die gemeinsame Bezugsgröße zu achten. Das heißt, die Gehalte in der Asche sind mit dem Ascheanteil der Kohlen auf die Elementgehalte in der Kohle umzurechnen.

Tabelle 6-2– Durchschnittliche Elementgehalte [mg/kg] in Gesteinen (jeweils trockene Substanz).

6.2.2 Verteilung Gesamtkohlenstoff im Abraumschüttungskörper Seese-Ost

(Anlagenband S1.3). Die „Kohlekomponente“ gelangt als *Kohlige Substanz* (= kohlige Verunreinigung der Hangendschluffsedimente) und als *Rohkohle des Flözes* (ungeschichtete Kohle „ugk“ am Top des 2. Lausitzer Flözes), die beim flözfreilegenden Abraumschnitt zusammen mit dem Flöz-Deckgebirge abgegraben und verkippt wird, in die Abraummischung. Darüberhinaus ist die *Flözkohle* (xylithische Kohle „xk“ an der Basis des 2. LF) zu nennen, die als kohlige (einschließlich mineralischer Bestandteile), von Wasserhaltungsgräben durchzogene *Basis des Kippenkörpers* beim Grundwasserwiederanstieg hydraulisch und über die Abgabe von Produkten der „Pyritoxidation“ für die Wasserbeschaffenheit wirksam wird.

Die *Mächtigkeiten* betragen: 0,5 bis 2,5 m, im Mittel 1,5 m Hangendschluff, 0,1-0,15 m „ugk“, sowie 0,1-0,15 m „xk“ anstehend unter der Kippenbasis. Zusammen 1,65 m verkipptes „kohliges Sediment“ (entsprechend 4,9 Vol.-%) der durchschnittlich 33,5 m mächtiger AFB-Kippe Seese-Ost. Die an den Proben aus Trockenkernbohrungen bestimmten Kohlenstoffgehalte reichen in der Abraumschüttung Seese-Ost von 0,2 bis 2 Gew. %, Abschnitte mit Gehalten um 0,5 % Cges. überwiegen. Nach dem Vergleich der Spülgutansprache bei den Spülbohrungen und lithologischer Kernbeschreibung/Analyse am Bohrkern sind in Bohrung SS5 Gehalte bis 5 % wahrscheinlich. Als Wertebereiche für die Konstruktion der kippengeologischen Profilschnitte wurden (0-0,5), (0,5-1), (1-1,5), (1,5-2,5) und (2,5-5) festgelegt.

Den im Durchschnitt 0,6 Gew.-% Kohlenstoff (Bohrkernanalysen) entsprechen ca. 1,5 Gew.-% Braunkohle (lt). Diese stehen den aus den Mächtigkeiten verkipptes kohlenstoffhaltiges Sediment von 4,9 Vol.-% bestimmbar 2 Gew.-% gegenüber ($RHO_{Kohle}=1,2 \text{ gcm}^{-3}$; $RHO_{Quarz}=2,65 \text{ gcm}^{-3}$).

Im Schwenkende, PS (8) – (8) (N – S) treten die geringsten Gehalte (< 0,5 %) auf. Zum Drehpunkt hin nehmen sie zu, (W – E) Profilschnitte 1, 3, 5 und 7. Die Variabilität der Kohlenstoffgehalte ist im Bereich des mittleren Strossendrittels, Profilschnitt (4) – (4) (N - S) und im Schwenkende am größten, PS (8) – (8) (N – S).

Ein Maximum an Cges. tritt im tieferen Abschnitt der Schüttung (ST3, SS5) sowie im oberen Abschnitt um 50-55 m NN auf. Letzteres ist vor allem auf die Kohlige Substanz der Hangendschluffsedimente zurückzuführen, welche ausschließlich in die Hauptkippe verstäurzt wurden, siehe Bohrung SS9. Das Maximum im tieferen Abschnitt ist wahrscheinlich auf die

ausgehaltenen Zwischenmittelsedimente zurückzuführen, die i.d.R. an den Böschungsfuß der Vorkippe verstürzt werden, Bohrung SS4.

6.2.3 Verteilung Gesamtkohlenstoff im Abraumschüttungskörper Meuro

(Anlagenband M1.3). Im Tagebau Meuro mit mächtigem Hangendschluff, wurden große Mengen Kohlekomponente als *kohlige Substanz* verkippt. Dazu kommen wie in Seese-Ost die 0,10-0,15 m Flöz-Kohle „ugk“ infolge Flözfreilage. Zu den in Seese-Ost wirksamen Kohleinträgen sind in Meuro darüberhinaus Flözteile der vom *Altbergbau auf das 1. LF* stehengebliebenen Restpfeiler mit in die AFB-Kippe gelangt.

Die *Mächtigkeiten* betragen 10-11 m Hangendschluff, 0,1-0,15 m „ugk, lediglich abschätzbare Menge Kohle 1. LF und 0,1-0,15 m „xk“ anstehend, liegend zur Kippenbasis. Zusammen ca. 15 m (entsprechend 28 Vol.-%) verkipptes „kohliges Sediment“ der im Mittel 53,4 m mächtigen AFB-Kippe Meuro.

Die Kohlenstoffgehalte des Verkippten Abraums Meuro reichen von *0,3 bis ca. 12 Gew.-%*. Als Wertebereiche zur Profilschnitt-Konstruktion wurden (0-0,5), (0,5-1), (1-1,5), (1,5-2,5), (2,5-5) wie für Seese-Ost und zusätzlich (5-7,5), (7,5-12,5) festgelegt. Lediglich zur Aufstellung der Bilanz (erfolgter Eintrag – festgestellte Gehalte) wird der für das Reaktionsgeschehen beim Grundwasserwideranstieg wenig aussagekräftige durchschnittliche Gehalt Gesamtkippe von *4 Gew.-% Kohlenstoff* (Bohrkernanalysen) angegeben. Dieser entspricht *9,6 Gew.-% Braunkohle (lt)* und steht zum Vergleich mit den aus den oben genannten 28 Vol.-% bestimmbaren ca. 14 Gew.-%. Restkohle 1. LF mit 4m zu hoch angesetzt.

Entgegen der *Durchschnittsbetrachtung* kennzeichnen *größere zusammenhängende Vertikalabschnitte stark voneinander abweichender Gehalte* die tatsächliche Veränderung der Kohlenstoffwerte im Kippenkörper Tagebau Meuro. Bis 25 m mächtige Abschnitte enthalten *über 5 % Kohlenstoff*. Dem stehen bis 35 m mächtige Abschnitte mit Gehalten *unter 1 % gegenüber*.

Die starke Veränderung der Kohlenstoffgehalte im *Kippen-Vertikalprofil* spiegelt den Aufbau der AFB-Innenkippen aus *Kippscheiben* wider. Zurückzuführen auf die *bodenmechanischen Anforderungen* an die Vorkippe (standfest für Gleisrost Brückenstütze) und dementsprechend feinkornanteilarmer „rolliger“ Schüttung werden die „bindigen“ Deckgebirgssedimente, darunter die reichlich kohlige Substanz führenden Hangendschluffe in der Tendenz in die oberen Scheiben verkippt und verursachen somit den in der Kippe prinzipiell *hangendwärts steigenden Anteil „Kohlekomponente“*. Innerhalb der

Zwischenschüttung (2. Hauptschüttung) vollzieht sich ein *abrupter Anstieg* auf maximale Werte.

Die (S – N) Profilschnitte 4, 6 und 8 durch die Abraumschüttung zeigen das Einsetzen stark erhöhter Kohlenstoffwerte in Höhen um *80 bis 90 (MT1) m NN* im Süden und im Norden. Zum tieferliegenden *Bereich* des Schwenkendes im Osten liegt der Einsatz erhöhter Kohlenstoffgehalte bei *70 m NN*, Profilschnitt (5) – (5) (NW – SE), Profilschnitt 10 (SW – NE).

Praktisch *kohlenstofffrei* sind Vorkippe und Zwischenschüttung, Bohrungen im Schwenkende MT1, MT13 und MT15. Zurückgehende Gehalte im obersten 5 m-Kippenabschnitt sind auf die Verdünnung durch *Melioration* mit Kalk zurückzuführen.

Bei *vermindertem Hangendschluffanteil* und im Tiefschnitt erfaßten *Rest des Oberflözes (1. LF)* werden im Bereich Schüttung MT8 die max. Kohlenstoffgehalte, Abraumschüttung Meuro angetroffen. Ursache ist die Auswaschungsrinne „Anna Mathilde“. Diese Oberflöz-Kohle ist gut erkennbar am *Schwefeldefizit* gegenüber den schwefelreichen (Sulfid) Hangendschluffsedimenten.

6.2.4 Gesamtschwefel

Ziel der Schwefelanalytik bei der Geologischen Erkundung der Abraumschüttungskörper ist die Kennzeichnung der *räumlichen Verteilung* des versauerungswirksamen Eisendisulfid. Der für zutreffende Analysewerte der *Schwefelbindungsform S_{di}* erforderliche Aufwand bei der Probenahme – Stickstoff-Begasung und sauerstoffdichte Verpackung des Bohrkernmaterials ist fehlerbehaftet, Feldmann und Merkel 2000, Hoth 2000 und steht hinsichtlich der vordringlichen Raum-Aussage in keinem wirtschaftlichen Verhältnis zum möglichen Zugewinn an Information gegenüber der „robusten“ *Analytik Gesamtschwefel*. Die beim Kontakt mit Luftsauerstoff ablaufende Oxidation des Disulfids und entsprechende *Unterschätzung der tatsächlichen Disulfidgehalte* ist insbesondere bei der im Erkundungsprogramm nach dem Bohrkernausbringen erfolgenden Herstellung der Mischproben und anschließender Probenaufbereitung praktisch nicht vermeidbar.

Das Element Schwefel ist kohlebildend und gelangt syn- und epigenetisch in die Braunkohle. Sowohl die *Kohle* als festländische Bildung sowie die *kohlige Substanz* in den flachmarin gebildeten Sedimenten des *Flöz-Nebengesteins* (Hangendschluff, Zwischenmittel) sind schwefelreiche Bestandteile der tertiären Schichtfolge. *Schwefel* ist global in

Braunkohlen und dem Nebengestein *angereichert* und tritt *anorganisch* (Sulfid, Sulfat) und *organisch gebunden* (inkohlte Pflanzenbausteine) auf, Lissner & Schäfer 1956.

Die *Ursache der Schwefelführung* ist verschieden für Kohleflöz und Flöz-Nebengestein und zur Beurteilung des Disulfidanteils am Gesamtschwefel von Interesse.

- | | |
|---|--|
| Kohleflöz | <ul style="list-style-type: none"> - <i>syngenetisch</i>: im Flöz/bei Flözbildung an „biochemischer Barriere“ (Anreicherung des Schwefels der Pflanzenbaustoffe bei der Inkohlung) - Eintrag von Verwitterungsprodukten aus im Süden gelegenen eisensulfidhaltigen Grundgebirge in das Braunkohlenmoor; FeS-Gel, aufbereitet zum Melnikovit, Lissner & Schäfer 1956. - <i>epigenetisch</i>: Infiltration aus Flöz-Nebengestein (Hangendschluff und/oder über Flözbänken gelegene Zwischenmittel) |
| Flöz-Nebengestein | <ul style="list-style-type: none"> - mit feinst aufgearbeiteter Kohliger Substanz aus an der Oberfläche angewittertem Kohleflöz |
| Hangendschluff, Zwischenmittel (in Kohleflöz) | <ul style="list-style-type: none"> - aus dem Abbau reichlich enthaltener organischer Substanz (eingeschwemmtes abgestorbenes pflanzliches Material) durch anaerobe Bakterien, die Fe³⁺ zu Fe²⁺ und SO₄²⁻ zu S²⁻ reduzieren und so Sauerstoff gewinnen (Eisensulfidschlamm -> Hydrotroilit FeS · nH₂O -> Melnikovit (Gelform FeS₂) -> Markasit (unter sauren Bedingungen, Degens 1968 wie in der Ca-armen und Fe-reichen Kohle der Niederlausitz,) oder Pyrit (unter basischen Bedingungen, Kohlen Mitteldeutschlands) - dem Sulfat des Meerwassers des brackisch – marinen Sedimentationsraums; mit der Konsequenz, daß von derartigen marinen Sedimenten überlagerte Kohlen stets mehr Schwefel enthalten als bei Überdeckung mit Süßwassersedimenten, Degens 1968. |

Position im Kohleflöz, Flöz-Alter und Entfernung des Liefergebiets zum Kohlebildungsraum lassen Rückschlüsse auf den Schwefelgehalt in der *Flöz-Kohle* und dem kohlige Substanz führenden *Flöz-Nebengestein* zu. Grundsätzlich erhöhte Schwefelgehalte weist der *oberste Flözabschnitt* auf, von dem bei der Flözfreilage im Durchschnitt 0,15 m in die Abraumsedimentmischung gelangen. Ursache ist nach Vulpius & Neubert 1982 die Infiltration über das Grundwasser aus dem Flöz-Hangenden, epigenetische Zufuhr. Im derartig beeinflussten oberen Abschnitt des Kohleflözes („ungeschichtete Kohle, ugk“ des 2. LF) sind die Schwefelgehalte mit 6 % (Kohle wf) bis 10-fach höher als mit 0,6 % im Flözinneren. Gluskoter & Simon 1968 und Ruch et al. 1974 (beide cit. in Casagrande et al. 1977) beschreiben derartige vertikale Schwefelverteilungsmuster in Steinkohleflözen.

Entsprechend der Entstehung des dem Flöz bzw. einer Flözbank folgenden *Hangendschluff* bzw. *Zwischenmittel* (Bezeichnungen des Bergbaus) enthalten diese Sedimente aufgearbeitete Kohle der Flözoberfläche samt feinst verteilter mineralischer Bestandteile und Verwitterungsbildungen, z.B. Alaun. In der geologischen Literatur werden die Hangendschluffe als Letten, Kohlenletten, Braunkohlenton, *Alaunton* bezeichnet, Ahrens & Lotsch 1963.

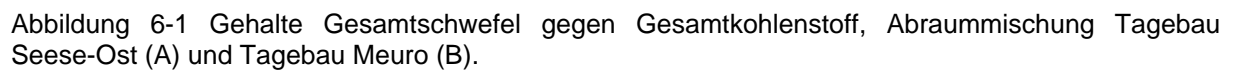
So, wie generell ältere Braunkohleflöze höhere Sulfidgehalte aufweisen als jüngere, holzreichere, zeigen dies auch die *praktisch sulfidfreien Kohlen des 1. LF im Vergleich zu denen des 2. LF*, G. Voigt (LSAB) 2/1998. Nach Brückner 1928 (cit. in Gmelin 1969) hat er sich auf Kosten des organischen Schwefels erhöht. Erhöhte Schwefel- und Eisengehalte in Kohle-Flöz und Flöz-Nebengestein der südlichen Lagerstätten des Niederlausitzer Braunkohlenreviers (z.B. Tagebau AFB-Innenkippe Meuro) sind im Zusammenhang mit *nähergelegenen Abtragungsgebieten im Süden*, beispielsweise den heutigen Grundgebirgsauftragungen „Koschenberg“ und „Oßlinger Berge“ (Grauwacken) sowie der Lausitzer Graniten zu sehen, Süss 1964.

Angaben zum Schwefelgehalt der *Flöz-Nebengesteine* existieren aus der Flözerkundung und einzelnen jüngeren Untersuchungen des Flözdeckgebirges zur Pyritoxidation. 2,55 Gew.-% Gesamtschwefel gibt Thiernig (mdl. Mittlg.) 1998 als Durchschnittswert für den Hangendschluff, Tagebau Seese-Ost an, *bis 2,9 Gew.-%* Berger 2000 für den Hangendschluff, Tagebau Welzow-Süd. Die Änderung der Schwefelgehalte im Vertikalprofil der Hangendschluffe, die im Tagebau Meuro 10 bis 11 m Mächtigkeit erreichen, sind nicht bekannt. Nach dem in der Tendenz hangendwärts abnehmendem Inhalt an organischer Substanz, Böhme 1980 und zurückgehendem Anteil aus der Aufarbeitung der Flözkohle/Verwitterungsprodukte, sind *maximale Schwefelwerte an der Basis* und Abnahme zum Hangenden wahrscheinlich. Steigende Mächtigkeit dieser Schluffsedimente bedeutet somit *nicht* linear zunehmende Schwefelgehalte in der Abraumschüttung. Die Bildung der Hangendschluff-Sedimente unter flachmarinen Verhältnissen wird zudem in nach vorherigem Kohlenmoor gegliederten Einzel-Ablagerungsräumen stattgefunden haben und so zu einem fleckigen Verbreitungsmuster der chemischen Zusammensetzung geführt haben.

Auf den Zusammenhang zwischen der enthaltenen Menge *Kohle, kohliger Substanz und dem Schwefel* in der Abraumschüttung weist die Abbildung 6-1, in der für die Abraumschüttung Seese-Ost und Meuro die Gehalte Schwefel gegen Kohlenstoff abgetragen sind.

- Zu jedem Wert C_{ges} in der Abraumsedimentmischung existiert ein bestimmter maximaler Gesamtschwefelgehalt. *Seese-Ost*: $\text{Gesamtschwefel}_{\text{max.}} = 0,3 \text{ Gesamtkohlenstoff}$; *Meuro*: $\text{Gesamtschwefel}_{\text{max.}} = 0,25 \text{ Gesamtkohlenstoff}$. Damit ist auch in der Abraummischung erkennbar: Die Meuroer Kohle, kohlige Substanz ist schwefelärmer als die Seeser Kohle.
 - Ist kein Kohlenstoff enthalten, fehlt auch Schwefel in der Abraummischung.
-

- Bestimmte Bereiche der Abraumschüttung Meuro (Bohrungen MT8, MT10) weisen im Verhältnis zum enthaltenen Kohlenstoff geringe Schwefelwerte auf, „Schwefeldefizit“.



Zur Bewertung der Schwefelgehalte der untersuchten Abraumschüttungen und des Zusammenhangs zwischen dem Auftreten kohligter Substanz und Schwefel sowie als Grundlage für die *Abschätzung des Disulfidanteils am Gesamtschwefel* sind Ergebnisse geochemischer Untersuchungen an „Flöz-Nebengestein“, „Kohle“ und „Abraumsedimentmischung“ aus der Literatur in Tabelle 6-3 zusammengestellt.

6.2.5 Ermittlung der Gehalte an Eisendisulfid FeS₂

Maßgebend für das Versauerungspotential der Abraumschüttungen Seese-Ost und Meuro ist der Gehalt an oxidierbarem Eisendisulfid. Weite Verbreitung in Braunkohlen hat nach geologischen Felduntersuchungen *Markasit*, der bevorzugt unter sauren Bedingungen entsteht, gegenüber Pyrit bei Kalkpufferung, Degens 1968. Zwei Drittel des Eisendisulfids in der *Kohle* der Niederlausitz ist Markasit, G. Voigt (LSAB) 5/1996. Gegenüber Pyrit ist diese Modifikation des FeS₂ instabiler und *reaktionsbereiter*, z.B. hinsichtlich des wiederaufgehenden Grundwassers. Grundlagen für die Ermittlung des Eisendisulfidgehaltes sind:

- die im Geologischen Kippenerkundungsprogramm bestimmten *Gesamtschwefelgehalte*,
- der aus Untersuchungen bekannte *Disulfidschwefelanteil* am Gesamtschwefel von Kohle-Flöz bzw. kohlige Substanz führenden Deckgebirge, welches in die Abraumschüttung gelangt, Tabelle 6-3,
- Einschätzung, ob kohlige Substanz führendes *Flöz-Nebengestein* (Hangendschluff, Zwischenmittel) oder *Flöz-Kohle* (Flözfreilage, Reste Altbergbau) die Abraumsedimentschüttung dominiert und Nutzen der zugehörigen Relation zwischen Disulfid- und Gesamtschwefelgehalt. Dies erfolgt über die Kennzeichnung der Abraumschüttungen nach ihrem Gesamtschwefelwert in Relation zum Kohlenstoffgehalt, Abb. 6-1.

Der Zusammenhang zwischen Schwefelwerten (Bindungsformen) und Anteilen kohligter Substanz aus der Literatur und der Relation zwischen Gesamtschwefel- und Gesamtkohlenstoffgehalt der hier untersuchten Abraumsedimentschüttungen Seese-Ost und Meuro ist:

Hangendschluff des 2. LF
S_{ges.}=0,2 C_{ges.}

S_{di}=0,6-0,8S_{ges.}

Kohle 2. LF
S_{ges. max.}=0,06C_{ges.}

S_{di}=0,1S_{ges.}

untersuchte Abraumschüttungskörper
Seese-Ost: S_{ges. max.}=0,30C_{ges.}
Meuro: S_{ges. max.}=0,25C_{ges.}

Hangendschluffsedimente dominieren die Relation Gesamtschwefel in Abhängigkeit vom Kohlenstoffgehalt in den untersuchten Abraumschüttungen. Dementsprechend wird $S_{di}=0,65$

Sges. (Berger 2000, Rolland et al. 1998b) für die Errechnung der Eisendisulfidgehalte verwendet.

FLÖZ-NEBENGESTEIN

Sges.	Sdi/FeS ₂	SSulfat	Sorgan.	Untersuchungsobjekt	Bemerkungen	Autor
Masse-%						
2,55 (wf)				Tagebau Seese-Ost, Hangendschluff Flözbank 1 (2. LF)	Mischprobe Gesamtmächtigkeit	Thiemig (mdl. Mittlg.) 1998
1,02				Liegendschluff (2. LF)		
2,89 1,77	1,70 1,25	0,20 0,14	0,99 0,39	Tagebau Welzow-Süd, Hangendschluff (2. LF) Liegendschluff (2. LF)	Durchschnitt von Einzelproben Sges.=0,19Cges., Sdi=0,59Sges. Sges.=0,26Cges., Sdi=0,71Sges.	Berger 2000
> 4	0,6- 0,8Sges.			Tagebau Jänschwalde, Hangendschluff (2. LF)	entspricht ~ Durchschnitt Sges. der Fraktion < 0,063 mm, Abraumsedimentmischung Meuro	Rolland et al. 1998b
	bis 6 Vol.-% FeS ₂			Tagebau Welzow-Süd, Hangendschluff (2. LF)		Böhnisch & Schneider 1998
0,38 (0,96 SO ₃)				Erkundung Schlabendorf-Mitte, 1985 „tertiäre Schluffe“ (Obere Briesker Schichten) Hangendes 2. LF	5 Proben	Wurl et al. 1996
	1,5- 4,2Sdi(= 2,8-7,9 FeS ₂)			Tagebau Zwenkau (südöstlich Leipzig), unverritzte Haupt-Deckschichten		Pleßow & Heinrichs 2000

KOHLE

Sges.	Sdi/FeS ₂	SSulfat	Sorgan.	Untersuchungsobjekt	Bemerkungen	Autor
Masse-%						
2,58 (wf)	0,37	0,36	1,84	Tagebau Seese-Ost, Flözbank 1 (2. LF)	Mischprobe Gesamtmächtigkeit	Thiemig (mdl. Mittlg.) 1998
1,0 wf				Tagebau Seese-Ost Kohle (Kesselkohle), 2. LF	0,8-1,4	Böhnisch in Nowel et al. 1994
0,35 (wf)				Tagebau Meuro Kohle (Brikettierkohle), 2. LF	0,25-0,45	
bis 6 (wf)	s. Bem.	s. Bem.		2. LF, Oberster Bereich	Sdi=0,08+0,03 (Sges.) ² Ssulf.=0,07- 0,07Sges.+0,04(Sges.) ² (jeweils wf)	Vulpus & Neubert 1982
0,62+- 0,15				2. LF, Flöz-Inneres		
	bis 0,19 FeS ₂			Kohle Lausitzer Braunkohlerevier		Rösler 1991
16.000 mg/kg				Braunkohle ehemalige DDR	trockene Substanz (wf)	Rösler et al. 1976

ABRAUMSEDIMENTMISCHUNG

Sges.	Sdi/FeS ₂	SSulfat	Sorgan.	Untersuchungsobjekt	Bemerkungen	Autor
Masse-%						
0,3-0,5				Tagebau Jänschwalde Weißagker Berg > 60 cm Tiefe (Bodenprofil)	bei Cges. 0,9-2,0 % , trockene Abraumsedimentmischung	Hüttl et al. 1996
	bis 1,82			AFB-Innenkippe Tagebau Niemtsch		Grunert et al. 1998
	5 % FeS ₂			Braunkohlenrevier südlich Leipzig Abraumberge		Rüde et al. 1998
	3,6 % FeS ₂			Tagebau Cospuden und Zwenkau „sedimentärer Mixtit“ (Kippe)		Pentinghaus 1998
bis 2,5				Kippe Tagebau Espenhain		Feldmann & Merkel 2000

Tabelle 6-3 Zusammenstellung geochemischer Analysen (Schwefel, -Bindungsformen, Kohlenstoff) an Flöz-Nebengestein – Kohle - Abraumsedimentmischung, verschiedene Autoren.

Mit zunehmendem Gesamtschwefelgehalt nimmt der Disulfidschwefelanteil von Kohlen (kohliger Substanz) zu, Gmelin 1969, S. 110. Für eine Abschätzung der Disulfidanteile gemäß diesem Zusammenhang wurden jedoch in vorliegender Arbeit keine Untersuchungen vorgenommen.

6.2.6 Verteilung von Gesamtschwefel und FeS₂ im Abraumschüttungskörper Seese-Ost

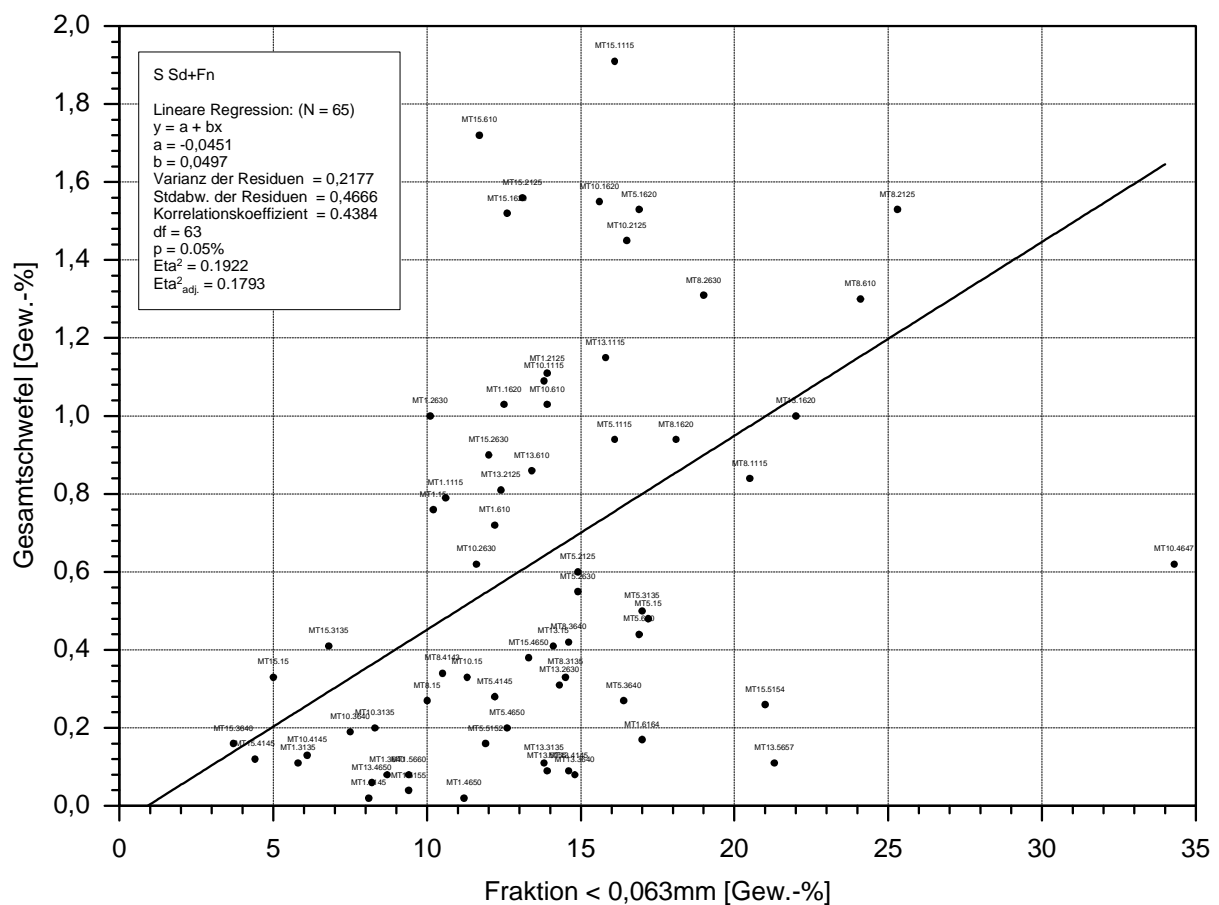
(Anlagenheft). Einleitend zum Parameter Gesamtschwefel wird der in den geologischen Bildungsbedingungen begründete Zusammenhang mit der kohligen Substanz erläutert. Weitgehend folgt in der Abraumschüttung Seese-Ost die Teufenänderung der Schwefelwerte dem Kohlenstoff. In die Abraumschüttung Seese-Ost ist keine kohlige Substanz mit im Verhältnis zum Kohlenstoff geringen Schwefelanteil gelangt, was kennzeichnend für das 1. LF ist (Altbergbau) und in Bereichen der Abraumschüttung Tagebau Meuro auftritt. Der Eintrag von Schwefel in die AFB-Innenkippe Tagebau Seese-Ost erfolgt hauptsächlich über das kohlige schwefelreiche Flöz-Nebengestein, *Hangendschluff* und ausgehaltene *Zwischenmittel*.

Als Sediment mit „Schwefeldefizit“ gegenüber Cges. fallen die drei Basisproben ST3.2628, ST7.26 und ST15.26 auf Abbildung 6-1 auf. Deren Schwefelwerte sind durch nicht abgegrabene „xylithische Kohle, xk“ und/oder relativ *schwefelarmes Liegendenschluffsediment* mitgeprägt. Ausgehaltene Zwischenmittel, die i.d.R. an die Basis der Kippe verbracht werden, z.B. ST8.3638 zeigen kein Schwefeldefizit.

Die Gesamtschwefelgehalte des Abraumsediments reichen von 0,04 bis 0,39 % (0,05 bis 0,47% FeS₂). Die maximalen Gehalte in der *Abraumschüttung* betragen somit nur 15 % des Wertes für den Hangendschluff mit 2,55% Sges.. Gehalte zwischen 0,05 und 0,2 % dominieren.

Im *mittleren Strossendrittel* der Kippe treten Abschnitte mit 0,2 bis 0,3 % Sges. auf, PS (4) – (4) (N - S), Bohrung ST3. Im unteren Teil ist Sges. erhöht, darüber gehen die Werte zurück, zwischen 50 bis 55 m NN erreichen sie ein Maximum und gehen im oberen Kippenabschnitt wieder zurück. Demgegenüber treten im *Schwenkende*, PS (8) – (8) (N – S) mehrfach Abschnitte mit Sges. unter 0,1 % auf. Die Schwefelgehalte bei geringem Feinkornanteil, Bohrungen ST8 und ST15 zeigen über die gesamte Mächtigkeit der Schüttungsfolge vergleichbar hohe Werte wie im unteren Kippenabschnitt ST7, ST10. Dies weist auf die Herkunft dieser Schüttungsteile aus dem *tertiären Deckgebirge*.

Der höhere Schwefelgehalt der Feinkornfraktion (nicht dargestellt) führt infolge des in der Abraumschüttung Seese-Ost wesentlich vom *Geschiebemergel* herrührenden Feinkorn *nicht* zu einer Korrespondenz zwischen Schwefel und Feinkornanteil. Die Schwefelwerte und ihre vertikale Veränderung in *Spülbohrpositionen Seese-Ost* wurden aus der Schüttungsabfolge (Schwefelwertebereiche) benachbarter Trockenkernbohrungen extrapoliert. Für die *Abraummischung Meuro* mit Feinkorn überwiegend im verkippten sulfidführenden *Hangendschluff* ist dagegen die Schwefelgehaltsangabe in Spülbohrpositionen auf Basis der GR-Bohrlochmessung möglich.



6.2.7 Verteilung von Gesamtschwefel und FeS₂ im Abraumschüttungskörper Meuro

(Anlagenheft). Die gemessenen Gesamtschwefelgehalte Abraumschüttungsfolge Meuro reichen von 0,02 bis ~ 1,9 % (0,024 bis 2,3 % FeS₂).

Die Verteilung ist durch *größere zusammenhängende Vertikalabschnitte einheitlicher Gehalte* charakterisiert. Bis 25 m mächtig sind *1,0 bis 2,0 % Sges.* (1,2 bis 2,4 % FeS₂) enthalten; in Bohrung MS7 über die Gesamtmächtigkeit. Diese Sges. Werte liegen in der

Größenordnung von 50 % der für die Hangendschluffe bestimmten Werte. Auf der anderen Seite sind in bis 35 m mächtigen Abschnitten lediglich um 0,02 % Sges. enthalten, unterer Kippenteil.

Die Veränderung der Sges-Werte im *Vertikalprofil* Abraumschüttung Meuro gibt in groben Zügen den Aufbau der AFB-Innenkippe Meuro aus Kippscheiben wider: Vorkippe, 1. und 2. Hauptkippschüttung. Letztere ist gekennzeichnet durch den abrupten Anstieg der Sges.-Werte auf maximale Werte. Das Zurückgehen der Schwefelgehalte im obersten 5m-Kippenabschnitt ist Folge der *Melioration* mit Kalk, Verdünnung.

Die Profilschnitte 4, 6 und 10 durch die Abraumschüttung zeigen das Einsetzen stark erhöhter Werte im *Bereich* MS9/MS14, MS7/MT10 mit 60-70 m NN tiefergelegen, im äußersten *Süden* des untersuchten Teilfeldes Großbräsen mit 90 m NN deutlich *höher*, MT1. Die Neigung des Kippenkörpers nach Norden in Richtung zunehmender Strossenlänge (demzufolge Massendefizit und entsprechende Tieflage) wird deutlich in PS (10) – (10) (SW – NE).

Die Abraumschüttungsmassen, welche die *Vorkippe* aufbauen und zwischen ~ 45 m NN (MT13) und ~ 72 m NN (MT1) liegen, enthalten *meist unter* 0,5 % Sges (< 0,61 % FeS₂). Die 1. Schüttung der *Hauptkippe* (*Zwischenschüttung*), zwischen ~ 60 m NN (MT5) und ~ 89 m NN (MT1) gelegen, weist ebenfalls überwiegend Schwefelgehalte *unter* 0,5 % auf. In der 2. *Hauptkippschüttung*, Teufenintervall ~ 70 m NN (MT5) bis max. 119 m NN (MT1) werden neben Höchstwerten bis 1,91 (MT15) im überwiegenden Teufenbereich 0,5 bis 1,5 % Sges. erreicht.

Auf das „Schwefeldefizit“, bezogen auf die in der Abraummischung enthaltene Kohle, kohlige Substanz wurde bei der Erläuterung des Zusammenhangs zwischen Kohlenstoff- und Schwefelgehalt hingewiesen, Abschnitt 6.2.5. Das Defizit betrifft die Schüttungsbereiche, Bohrungen MT 8 und MT10. Beide Bohrungen befinden sich in dem tieferliegenden östlichen Teil des untersuchten Kippenareals. Nach *Maßgabe der Kohlenstoffgehalte* wäre hier mit den höchsten Schwefelwerten zu rechnen. Ursache der festgestellten geringen Schwefelgehalte sind in Größenordnungen hier verkippte Reste der schwefelarmen Kohle des 1. LF (Altbergbau), die nicht bei Förderung des 2. LF selektiv gewonnen werden konnten, Geipel & Zimmermann 1984. Der relative Anteil der in den übrigen Kippenbereichen schwefeleintragenden Hangendschluffe ist somit hier zurückgenommen.

6.2.8 Eisen

Allgemeine geochemische Charakterisierung – Vorkommen in der Lithosphäre - Das Element der „Eisenfamilie“ (Fe, Co, Ni und Cu) kommt nicht elementar vor, sondern gebunden in Mineralen, überwiegend in 2- oder 3-wertiger Form; mit Magnetit $\text{FeO} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$ in einer Phase auch nebeneinander als Fe^{2+} und Fe^{3+} . Eisen ist im Durchschnitt der *Erdkruste* zu 5 Gew.-% enthalten und bildet darin das häufigste Schwermetall. Die wichtigsten eisenhaltigen Minerale der *magmatischen Gesteine* sind *Silikate*, in denen Fe^{2+} neben anderen Metallen die freien Valenzen der SiO_4 -Tetraeder besetzt, z.B. im Biotit.

	Granit	Basalt	Sedimentgestein	Sandstein	Tonstein	Kalkstein	Braunkohle	Braunkohlenasche
(0)	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)
Fe	27.000/ 27.000	85.600/ 56.000	41.000	29.000/ 9.800	48.300/ 33.300	17.000/ 3.800	7.700	73.000

Durchschnittliche Eisengehalte [mg/kg] in Gesteinen, jeweils trockene Substanz.

(0)	untersuchte Elemente	NG, BG – Nachweisgrenze, Bestimmungsgrenze						
(1)	Granit	Vinogradov 1962 in Rösler & Lange 1975 / Taylor 1964						
(2)	Basalt	Vinogradov 1962 in Rösler & Lange 1975 / Taylor 1964						
(3)	Sedimentgestein	Wedepohl 1969						
(4)	Sandstein	Wedepohl 1969 / Turekian & Wedepohl 1961 in Mason & Moore 1985						
(5)	Tonstein	Wedepohl 1970 / V. 1962 in R. & L. 1975 (Schiefer und Tone)						
(6)	Kalkstein	Wedepohl 1969 / Turekian & Wedepohl 1961 in Rösler & Lange 1975						
(7)	Braunkohle (wf)	Darbinjan et al. 1987						
(8)	Braunkohlenasche	Darbinjan, zusammengestellt aus Judovic et al. 1985 und Rösler & Lange 1975 in Seim & Tischendorf 1990.						

A) Sand/Sandstein, Pettijohn et al. 1973, B.) Sand/Sandstein, Clarke, n=253 in Wedepohl 1967, C.) Feinkörnige Sedimente, Tissot & Welte 1978, D.) Braunkohle (waf), NL Revier, Böhnisch in Nowel et al. 1994, E.) Darbinjan, zusammengestellt aus Judovic et al. 1985 und Rösler & Lange 1975 in Seim & Tischendorf 1990.

Braunkohle (7): Dem Analysenwert liegt jeweils eine Mischprobe gesamtes Flöz zugrunde; demzufolge sind hohe Werte, wie bekannt z.B. für Schwefel und Titan im obersten Abschnitt des 2. LF „weggemittelt“.

Braunkohlenasche (8): Den Angaben ist die Annahme eines mittleren Aschegehalts zugrundegelegt. Bei Vergleichen von Elementgehalten in der Asche verschiedener Proben ist auf die gemeinsame Bezugsgröße zu achten. Das heißt, die Gehalte in der Asche sind mit dem Ascheanteil der Kohlen auf die Elementgehalte in der Kohle umzurechnen.

Bezieht man Verwitterungsbildungen, Sedimentgesteine und Metamorphite (z.B. gebänderte Eisenerze) mit ein, so spielen in der Lithosphäre mengenmäßig die schwer wasserlöslichen *Sulfide und Oxide* die größere Rolle. Eisensulfide und –Oxide sind in magmatischen und Sedimentgesteinen weit verbreitet.

In Gesteinen, Verwitterungsbildungen sowie in Böden weist häufig die *Farbe* auf das überwiegend enthaltene Eisenmineral bzw. schlecht kristallisierte Vorstufe und die *Oxidationsstufe* des Eisens.

gelbbraun	Goethit $\alpha\text{-FeOOH}$	Fe^{2+}	
orange	Lepidokrokit $\gamma\text{-FeOOH}$	Fe^{2+}	
blutrot	Hämatit $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$	Fe^{3+}	in älteren Sedimenten, aus Ferrihydrit entstanden
rotbraun	Maghemit $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$	Fe^{3+}	ferrimagnetische Form des Fe_2O_3
	Ferrihydrit $5\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$	Fe^{3+}	früher: amorphes Eisen(III)hydroxid“,
grün	Chlorit, Chamosit,	Fe^{2+} und Fe^{3+}	

	Glaukonit		
blaugrün	Fe-Hydroxydsalze, „grüner Rost“	Fe ²⁺ , Fe ³⁺	unter reduzierenden, nicht zu sauren Bedingungen gebildet

Aus der *Verwitterung eisenhaltiger Silikate und Sulfide* unter aeroben Bedingungen resultieren Oxide und Hydroxide, die Eisenlagerstätten bilden können (Oolithe, Bohnerze, Raseneisenerze). *Anreicherung* in Sedimenten unterhalb Lagerstättendimension erfolgt in *Peliten* aufgrund ständiger Wiederaufarbeitung sowie als *Porenraumzement* (z.T. sogenannte Ferricrete). In Kohle, organisch gebunden, in feinverteilten Sulfiden und Tonmineralen.

Boden – In Böden ist Eisen zwischen 0,2 und 5 Gew.-% enthalten. Es tritt als Oxid, Hydroxid, Silikat und in organischen Komplexen auf. Die *geringe Löslichkeit der Eisenoxide unter atmosphärischen Bedingungen* führt dazu, daß

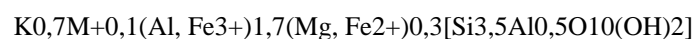
- Eisen kaum mit der Bodenlösung ausgewaschen wird,
- Eisen erst durch die Wechselwirkung zwischen Fe(III)-Oxiden und löslichen organischen Komplexbildern pflanzenverfügbar wird,
- auch bei hohem Eisengehalt im Boden *Eisenmangelerscheinungen* bei den Pflanzen möglich sind.

Vorkommen im verkippten Abraum - In der Abraummischung ist Eisen nach Bindungsform und Bildungsweise folgendermaßen enthalten:

- 1.) in mineralischen Sedimentbestandteilen des Flözdeckgebirges als *primäre detritische Komponenten* der überwiegend klastischen Sedimente des tertiären und quartären Deckgebirges
- 2.) organisch oder mineralisch gebunden in *Flözkohle, kohligter Substanz*,
- 3.) *sekundäre Bildungen*, z.B. Fe-Alaun Halotrichit $\text{FeAl}_2[\text{SO}_4]_4 \cdot 22 \text{H}_2\text{O}$ geogener Verwitterung aus der Einwirkung schwefelsaurer Lösung auf alumosilikathaltiges Sediment,
- 4.) *Bildungen* infolge Pyritoxidation durch Tagebauprozeß, Zwischenprodukte der Umsetzung des Sulfids zu $\text{Fe}(\text{OH})_3$ (Eisenhydroxidkrusten), FeSO_4

Ton- und Glimmerminerale stellen die dominierenden Fe-Träger in den Abraumschüttungen dar, in denen Fe strukturell und in ersterem auch adsorptiv gebunden auftritt.

Illit



Muscovit

Biotit	$K(Mg, Fe^{2+})_{3-x}(Fe^{3+}, Al)_x[Al_{1+x}Si_{3-x}O_{10}(OH, F)_2]$ nach qual. XRD und Mg-Gehalten unter NG allerdings nur geringe Gehalte
Chlorit (Thuringit)	$(Fe^{2+} + Fe^{3+} + Al)_6 [Al_{1,4}Si_{2,6}O_{10}(OH)_8]$
Glaukonit	$K_{0,7}M_{0,1}(Fe^{3+}, Al)_{1,5}(Mg, Fe^{2+})_{0,5}[Si_{3,7}Al_{0,3}O_{10}(OH)_2]$

Für die Bedeutung der *Tonminerale und Glimmer* als Eisenträger sprechen z.B. die deutlichen Maxima der Fe-Gehalte in Kippenbereichen mit hohem Anteil pelitreichen Geschiebemergels, vgl. auch Cornelius 1994 (cit. Ehlers 1994) zur Geochemie von „Gletscherablagerungen“. Dazu kommt, beim Hangendschluff-Sediment in Kombination mit Ton- und Glimmermineralen, *Eisendisulfid* (Pyrit, Markasit FeS_2), feinverteilt in kohligter Substanz des Hangendschluff-Sediments und in Flözkohle. Darbinjan 1989 zufolge sind Teile des Sulfids zunächst organisch gebunden in der Kohle und werden „später in sulfidische Phase umverteilt“.

Silikate und Oxide (Pyroxene, Ilmenit $FeTiO_3$, Magnetit) der Gesteine der Abtragungsgebiete im Süden, z.B. Granodioritmassiv, Biotitgranodiorit des Meißener Massivs.

„Eisenkrusten“ aus $Fe(OH)_3$, siehe unten Abschnitt „Bedingungen für die Lösung, Ausfällung und Verlagerung von Eisen,,.

Organisch gebunden in der Kohle, Kohligen Substanz, z.B. als Ca-Fe-Humat. Nach Finkelman 1981 in nennenswerten Mengen nur in Kohle mit Aschegehalten unter 5 % (Tagebau Meuro). Bei darüberliegendem Aschegehalt überwiegt die Bindung an Minerale in der Kohle.

Hydrosphäre

Oberflächenwasser	Meerwasser	0,007 mg/l Wedepohl 1970
	Flußwasser	0,0023 mg/l Wedepohl 1970 In <i>Oberflächenwasser</i> (sauerstoffhaltig) nicht oder nur in Spuren, da Eisen als schwerlösliches Oxid, Hydroxid ausgefällt.
	Sickerwasser	pH > 3,5: aufgrund der geringen Löslichkeit von Oxiden sind im <i>Sickerwasser</i> des Bodens nur bis max. 0,5 mg/l enthalten, die fast ausschließlich auf organische Eisenkomplexe beschränkt sind. pH < 3,5: unter sehr sauren Bedingungen treten anorganische Fe^{3+} -Komplexe auf.
	Grundwasser	Eh/pH, organische Substanz und entsprechende mikrobielle Aktivität steuern das geochemische Verhalten von Eisen im GW und GWL. Unter den meisten Bedingungen ist Eisen nur wenig mobil. Unter stark reduzierenden Bedingungen als Fe^{2+} im Grundwasser transportierbar. • Tertiär Lausitzer Revier 40...50 mg/l bei pH 4...5, Voigt 1990 (250mg/l)

		Sulfat); sauerstoffarm <ul style="list-style-type: none"> • GW in Lockersedimenten: < 0,02 ... 3 mg/l • pH5 bis pH9, „reduziert“: 1 ... 10 mg/l Fe²⁺ • sauerstoffhaltiges GW: Fe nur in Spuren enthalten • <i>Grenzbereich</i> reduzierendes/oxidierendes Milieu: hohe Eisengehalte im GW und bergfeuchten Sedimentporenraum durch Oxidation reduzierter Eisenverbindungen, „Verockerung“
	saures Kippenwasser	Gast & Katzur 1996 verglichen die Zusammensetzung des Grundwassers im Anstrombereich im <i>Vorfeld</i> der Kippen (Anstehend) und <i>innerhalb der AFB-Innenkippen</i> der Schlabendorfer und Seeser Felder. Nach 400 m Kippenpassage in der <i>relativ jungen</i> AFB-Innenkippe Schlabendorf-S (1975-1991) fanden sie 566 mg/l Fe ²⁺ im Vergleich zu 2 mg/l im <i>Vorfeld</i> der Kippe. Wisotzky 1994 Kippengrundwasser Berrenrath 64 ... 915 mg/l, Vorfeld 3,4 mg/l.

zusammengestellt aus Merkel & Sperling 1998

Bedingungen für die Lösung, Ausfällung und Verlagerung von Eisen – Von Interesse z.B. hinsichtlich der *Kopräzipitation und Adsorption* (Schadstoffrückhalt) von im sauren Kippenwasser freigesetzten Stoffen mit dem Fe-Hydroxid. Dabei ebenfalls wirksam ist die *Verteilung der Eisensulfide im Kippenkörper* sowie der Durchlässigkeitsverhältnisse.

Allgemein gilt: Die Festphase Fe(OH)₃ ist in einem großen Eh-pH-Bereich stabil gegenüber einem kleinen sehr sauren Bereich, in dem Fe³⁺ *gelöst* vorliegt. Oberhalb pH 4,8 beträgt die Konzentration von Fe³⁺ nicht über 10 µmol/l. Die geringe Konzentration von Fe³⁺-Spezies in natürlichen Wässern („normaler“ Eh-pH Bereich) wird durch die Polymerisation von Fe(OH)₃ zu stabilen Makroionen bzw. mikrokristallinen Formen (Kolloiden) bewirkt. Dagegen besteht ein großer Bereich, in dem Fe²⁺ *gelöst* vorliegt, so daß es v.a. in dieser Form migriert.

Die primären Eisenminerale (z.B. Silikate vor der Verwitterung) enthalten Eisen häufig als Fe²⁺. Das *bei der Verwitterung freiwerdende Eisen* wird nur zu einem geringen Teil in Tonminerale eingebaut, großenteils unweit vom Verwitterungsort wieder *sedimentiert*:

- unter *reduzierenden* Bedingungen, bei denen die Löslichkeit über einen weiten pH-Bereich sehr gering ist und bei Verfügbarkeit von Schwefel als *Sulfid* (Pyrit, Markasit), ohne Schwefel als Siderit,
- unter *oxidierenden* Bedingungen, bei denen die Löslichkeit oberhalb pH5 sehr gering ist, als Fe³⁺-Oxide, bzw. Hydroxide (frisch ausgefällte, schlecht kristallisierte Eisenhydroxide werden als Fe(OH)₃ zusammengefaßt). Die entstandenen Fe(III)-Oxide sind stabil und können als Kolloide oder als (rote) Hüllen auf Detrituspartikeln, z.B. Tonteilchen transportiert werden. Im *sauren Milieu*, unter pH5 werden sie wieder aufgelöst und andere Eisenminerale gebildet.

Aus *Eisensulfid* in den *Abraumkippen* entsteht Fe-Hydroxid in einer wesentlich schnelleren *Oxidationsreaktion* als etwa aus der Verwitterung primärer silikatischer Eisenminerale. Die *bakteriell unbeeinflusste Ausfällung* von Fe(III)-Oxyhydroxiden durch Sauerstoffzufuhr (in Wasser gelöst) hinein in Fe(II)-haltige Lösungen läuft *rasch* ab, bei neutralem pH in Minuten bis Stunden, im stark sauren, $\text{pH} < 3$ ist die Reaktionsgeschwindigkeit dagegen sehr gering.

Für die AFB-Innenkippen ist während der *Trockenliegezeit* unter dem Einfluß des von der Kippenoberfläche durch den *eisensulfidhaltigen Abraum* sickern den Niederschlags die Abscheidung von Eisenhydroxid im Porenraum in einer bestimmten Tiefe zu erwarten und beobachtet worden, Berger 2000. Für das diese Eisenkrusten aufbauende $\text{Fe}(\text{OH})_3$ ist eine *große spezifische Oberfläche* (50 ... 200 m^2/g , resultierend aus der geringen Kristallgröße) charakteristisch. Neben der *Mitausfällung* von durch die schwefelsaure Lösung aus der Abraummischung im oberen Kippenteil freigesetzten Spurenelement-Ionen kann sie somit im aufsteigenden Kippenwasser gelöste Elementfracht binden. Randbedingung hierfür ist:

- die Lage relativ zum Kippenwasserendstand,
- der pH-Wert des Kippenwassers bei Erreichen der Kruste. Im Falle saurer Bedingungen werden die Krusten wieder aufgelöst und vorher aufgenommene Frachten durch strömendes Grundwasser in die Grundwasserleiter der Tagebauumgebung gegeben.

Biosphäre – Eisen spielt in der Biosphäre eine Rolle in drei Bereichen:

- 1.) es ist essentiell in der Physiologie der Zellen beteiligt, in grünen Pflanzen: *Photosynthese*, in tierischen Lebewesen: *Sauerstofftransport*,
- 2.) Aufbau von *Hartteilen* (Fe in Calcit, Aragonit, Apatit, Opal),
- 3.) Mitwirkung von *Mikroorganismen* bei der Lösung und Fällung anorganischer Eisenverbindungen.

Zu 3.) *Eisenoxidierende Bakterien*, die gelöstes Eisen (Fe^{2+}) rasch oxidieren und als Oxid ausfällen können, sind weit verbreitet (Anreicherung zu Fe-Lagerstätten). Durch *reduzierende Bakterien* erfolgt mit Freisetzung von Fe^{2+} der *Abbau von Eisenoxid*.

Eisengehalte in der AFB-Innenkippe Seese-Ost (Anlagenband S1.3)

Die Abraummischung Seese-Ost enthält *zwischen 0,3 und 0,99%* (3.000 ... 9.900 mg/kg) Eisen. Die Eisengehalte liegen damit noch *unter dem Wertebereich eisenarmer Sedimentgesteine*, Kalksteine mit durchschnittlich 17.000/3.800 mg/kg und Sandstein mit im

Durchschnitt 29.000/9.800 mg/kg Eisen (s. Tabelle oben). Letzterer als Lockersediment das überwiegende Gestein der verkippten Tertiär- und Quartär-Deckgebirgsfolge.

Die Veränderung der Eisengehalte folgt in den unterschiedlichen Bereichen des Abraumschüttungskörpers bis ins Detail des Tiefenverlaufs dem *Feinkornanteil*. Aus den Bohrungen zusammengefaßt, Diagramm Abb. 6-2 (A). Dies spricht für das überwiegende Vorkommen des Eisens in *Ton- und Glimmermineralen* (Struktur, adsorptiv), welche in der Feinkornfraktion angereichert sind. Ein Zusammenhang zwischen Eisen und Schwefel ist demgegenüber in der Abraummischung Seese-Ost *nicht* erkennbar, Abb. 6-2 (B). Auch an der Sedimentfolge des „kippenrelevanten Abraums“, Braunkohlennebangesteine des künftigen Tagebaus Garzweiler II ermittelte Wisotzky 1994 deutlich höhere *Gesamteisengehalte* als der jeweils zum Disulfidschwefelgehalt gehörende Eisenanteil.

Das Fe-Maximum der Abraummischung Seese-Ost, ST15.1115 resultiert wahrscheinlich aus der Verkipfung besonders *eisenreicher Glimmerminerale*. Hierfür sprechen die zusammen mit dem Fe-Maximum beobachteten erhöhten Si- und Al-Gehalte.

Bemerkenswert ist, daß die untersuchten *Abraummischungen* beim Vergleich mit den durchschnittlichen Eisengehalten natürlich abgelagerter Sedimentgesteinen als *eisenarme Gesteine* zu bezeichnen sind. Von dem enthaltenen Eisen ist zudem nur ein *Bruchteil* auf *FeS₂* zurückzuführen. Welche Eisenmenge durch das Sumpfen (Vorfeldentwässerung) abgeführt worden ist, wäre aus Fe-Gehalten bergbauunbeeinflusster Deckgebirgsschichten zu bilanzieren.

Entsprechend dem Vorkommen des Elements Eisen v.a. mit den *Ton- und Glimmermineralen*, fallen die Fe-reicheren Abschnitte der Abraumschüttungsfolgen mit den verkippten pelitreichen *Geschiebemergel*-Massen zusammen. Sie liegen im Bereich des mittleren Strossendrittels, Beispiel Bohrung ST3 (0,6 % Fe) sowie insbesondere im *Schwenkende*, Profilschnitt 8, und im oberen Schüttungsabschnitt, wo Gehalte *um 1 %* erreicht werden.

In der Vorkippenschüttung und dem von *tertiären Abraummassen* dominierten Bereich der AFB-Innenkippen (Trockenkernbohrungen ST8, ST15) überwiegen Eisengehalte *um 0,4 %*.

Eisengehalte in der AFB-Innenkippe Meuro (Anlagenband M1.3)

Die Eisengehalte der Abraummischung Tagebau Meuro liegen *zwischen 0,4 und 2,1 %* (4.000 ... 21.000 mg/kg) und damit etwa *doppelt so hoch wie in Seese-Ost*. In Meuro ist gegenüber der Abraummischung Seese-Ost ein deutlich höherer Anteil des Eisens *sulfidisch*

gebunden. Nach stöchiometrischer Berechnung auf Basis der Gesamtschwefelgehalte und daraus ermitteltem Sdi sind es um 50 %; der Großteil des übrigen Eisens ist *an Ton- und v.a. Glimmerminerale* gebunden.

Beide Bindungsformen des Eisens sind in der Abraummischung Meuro mit den sulfid- sowie ton- und glimmermineralführenden *Hangendschluff-Sedimenten* realisiert und infolge der Verkipfung *in oberen Kippscheiben* sind diese durch die höchsten *Eisengehalte* der Abraumschüttungsfolge gekennzeichnet. Mit Gehalten zwischen *1 und 2 % Fe* in diesem relativ eisenreichen oberen Abschnitt des Kippenkörpers erreichen die ermittelten Eisengehalte jedoch *noch nicht* die Werte von „Sedimentgesteinen“ mit durchschnittlich 41.000 mg/kg.

Es besteht eine *abrupte Trennung* zu dem eisenarmen unteren Abschnitt des Kippenkörpers mit *0,4 bis 1 % Eisen*.

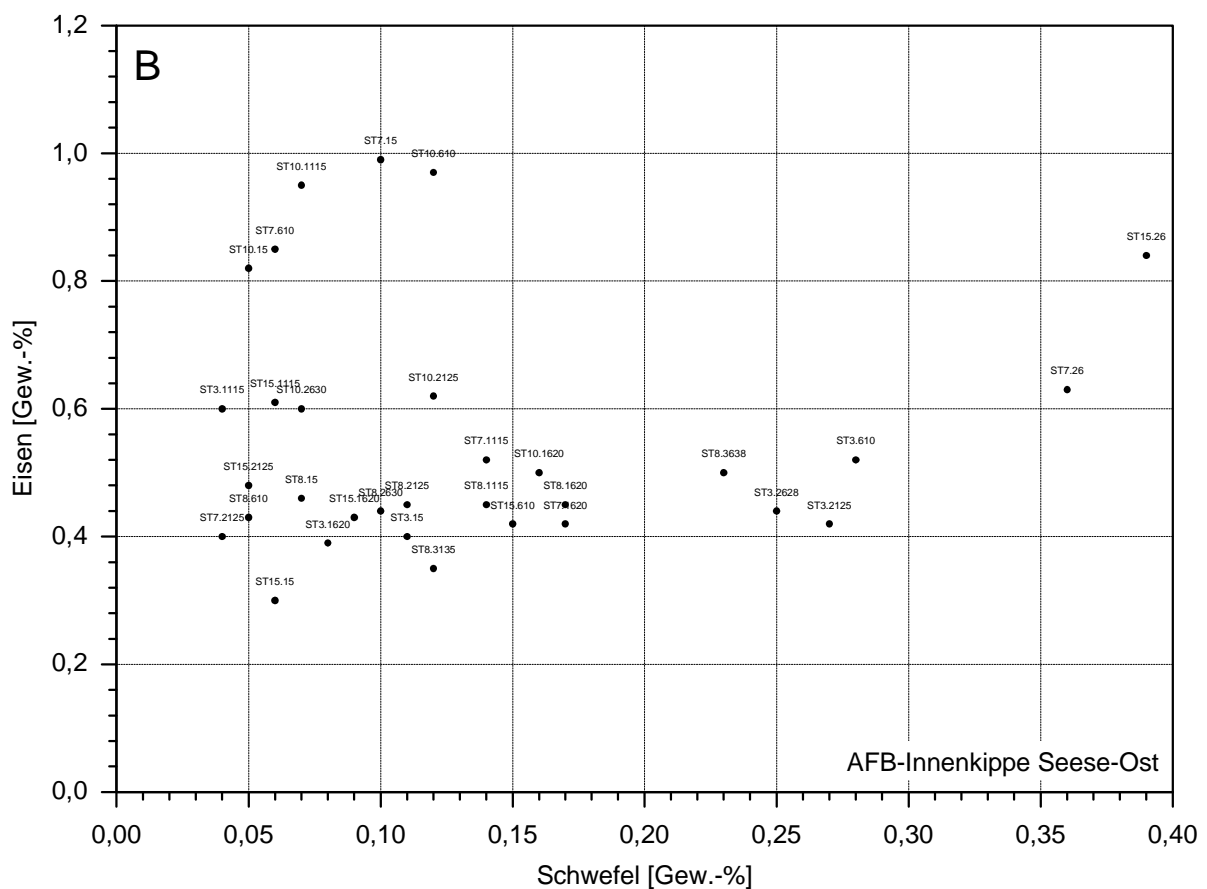
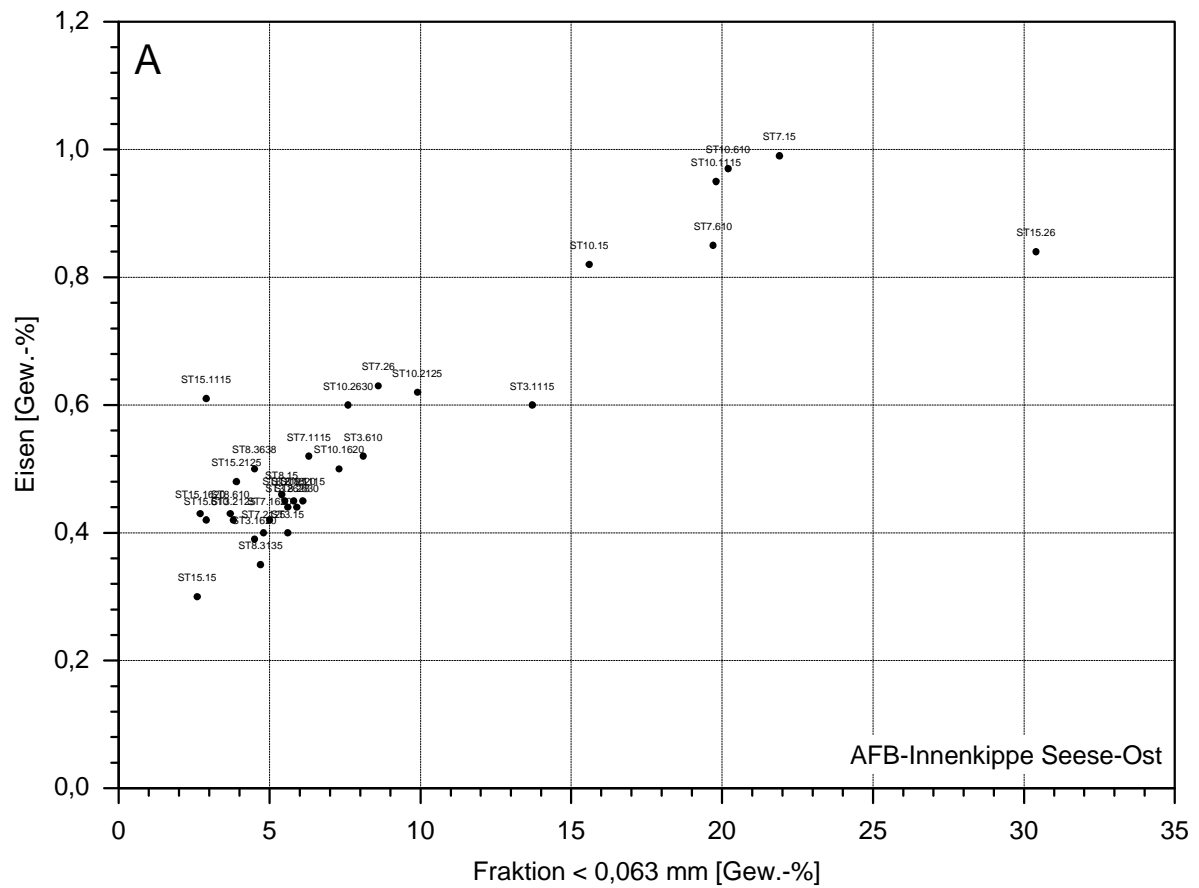


Abbildung 6-2 Eisengehalte in Beziehung zum Anteil an Fraktion < 0,063 mm (A) und in Beziehung zum Schwefel (B), Abraummischung Tagebau Seese-Ost.

6.2.9 Kobalt, Nickel und Zink

Konzentrationsangaben zu diesen Elementen aus Untersuchungen an Anstehendem, wie aus der Vorfelderkundung z.B. für den *Schwefelgehalt der Kohle* hinsichtlich der Verwendung (Kraftwerk, Brikettherstellung etc.) liegen nicht vor. Ebenfalls nicht aus gesonderten geochemischen Untersuchungen an den Kohlebegleitgesteinen, da hierfür „historisch“ keine Veranlassung bestand.

Sie sind aber wesentlicher Teil der *aus den Kippenkörpern mobilisierbaren Stofffracht*. So beobachtet Berger 2000 mit Verwitterungsversuchen zur Ermittlung der Elementfreisetzung als hauptsächliche, in der Abraummischung Welzow-Süd enthaltene Spurenelemente Zn, Co, Ni, As und Cr. Im schwefelsauren Kippenwasser („Tonne“) wurden v.a. *Zn, Ni, Co* freigesetzt. Er beschreibt die Mobilität der Spurenelemente als abhängig von Ionenstärke, pH-Wert, Komplexbildnern und mikrobieller Aktivität (bzw. geeigneten Milieubedingungen) und resümiert als dominierenden Faktor für die Mobilisierung die *pH-Absenkung unter 3*, vgl. Wisotzky 1994.

Zur Beurteilung der *mobilisierbaren Spurenelementmengen* und wann diese wo durch das aufsteigende saure Kippenwasser freigesetzt werden, ist die laterale und vertikale Verteilung in den Kippenkörpern zu kennzeichnen. Mit dem Kippenerkundungsprogramm konnten *in der Feinfraktion (< 0,063 mm)* der Abraummischung Konzentrationen zwischen *5 und 270 mg/kg* dieser Metalle bestimmt werden.

Kohle, kohlige Substanz mit FeS_2 , *Ton- und Glimmerminerale* sowie *Karbonat* sind die wesentlichen, mit dem aufgehenden Grundwasser zum Kippenwasser *reagierenden* mineralogisch-petrographischen Komponenten. Diese liegen in einer, von Geologie (Deckgebirgsmächtigkeit und –Zusammensetzung) und Schüttungstechnologie abhängigen *Abraummischungsparagenese* vor.

Für insgesamt in dieser Arbeit behandelte *Spurenelemente* ist eine Zuordnung zu den *Abraumkomponenten* möglich:

- Die in der Abraummischung festgestellte räumliche Verteilung von *Titan* spricht für die Assoziation mit *Ton- und Glimmer-Mineralen*,
 - die Verteilung des *Mangan* für die Zuordnung überwiegend zu den Karbonat-Mineralen (Calcit im Geschiebemergel),
 - Für *Co, Ni und Zn* ist das Vorkommen *in sulfidischer Form* neben bzw. mit dem in der *Kohle, kohligen Substanz* auftretenden FeS_2 wahrscheinlich.
-

Ni, Co, Cu, Zn, Ag, Au, Tl, As geben Rahmdohr & Strunz 1978 als typische Spurenelemente im Pyrit an; *Ni, Co* und As in *diadochem Ersatz des Fe im Mineral Pyrit*, die übrigen als mechanische Beimengung anderer Erze. Entsprechend der *Korrelation* der ermittelten Co-, Ni- und Zn-Konzentrationen *mit Fe* im Eluat aus Säulenversuchen mit Abraummischung Tagebau Cospuden führt Hülmeyer 2002 diese Spurenelemente auf FeS₂ zurück, im Gegensatz zu den *nicht* mit Fe korrelierenden Cu, Cd und Pb.

Für *Sulfidminerale* in Kohle und kohliger Substanz der Niederlausitzer tertiären Schichtenfolge (Flöz- und Deckgebirge) kommt indirekter detritischer Eintrag über Flußläufe aus südlich gelegenen Abtragungsgebieten in Frage, Süß 1964. Aus dem *Lausitzer Granitmassiv* und der *Lausitzer Grauwacke* wurden bei der Verwitterung und Abtragung Pyrit in feinverteilter Form im Gestein sowie aus hydrothermalen Erzgängen freigesetzt und in kolloidaler Form in den Kohlebildungsraum transportiert. Vor allem letzteres betrifft auch *eigenständige Sulfidminerale* von Co, Ni und Zn.

„Die *Eisenzufuhr* zum tertiären Torfmoor erfolgte bevorzugt zu den Lagerstätten des Zentralgebietes des Niederlausitzer Braunkohlereviere. Die Fe-Gehalte der Verbrennungsrückstände sind dort am höchsten, wo *eisenhaltige Gesteine* (Grauwacken, basische Eruptivgesteine) nahe dem Torfmoor anstehen (z.B. Koschenberg)“, Süß 1964.

	Fe ₂ O ₃ [Gew.-%]	Fe ₂ O ₃ [Gew.-%]
	Asche, wf	Kohle, wf
Tagebau Meuro	32	1,76
Tagebau Seese-Ost	18,9	1,62

Angaben aus Süß 1964

Die Spurenelementgehalte der untersuchten Abraummischung unterscheiden sich gravierend von denen natürlich abgelagerter Sedimentgesteine. Vertikale Umverteilung der Schichtenfolge bei der Abgrabung und die Verkippung von Feinkornreichem in obere Kippscheiben führt dazu, daß z.B. in den Kippenkörpern Kobalt mit 20 mg/kg in einem Höhenniveau vorliegt, in dem vorbergbaulich tertiäre und pleistozäne Sande mit durchschnittlich 0,3 mg/kg Co anstanden.

Kobalt

Allgemeine geochemische Charakterisierung – Vorkommen in der Lithosphäre -

Kobalt gehört mit Eisen und Nickel zur Gruppe der *Eisenmetalle*. Das chalkophile Element tritt am häufigsten in der Oxidationsstufe +2 auf, in der es in einfachen Verbindungen beständiger ist als Co^{3+} . Das Co^{2+} -Ion mit 0,72 Å ist ähnlich groß wie Fe^{2+} (0,74Å) und Ni^{2+} (0,69Å). Häufig kommt Co^{2+} daher in Eisenmineralen wie dem Pyrit vor und tritt fast immer gemeinsam mit Nickel auf. Das durchschnittliche *Co/Ni*-Verhältnis ist 1:4.

Kobalt ist in der Erdkruste zu durchschnittlich 25 mg/kg enthalten. Die magmatische Differentiation führt zur Anreicherung von Cobalt in *basischen und ultrabasischen Gesteinen* und darauf entwickelten Böden. Kobalt wird überwiegend *als Nebenprodukt* auf sedimentären Kupfererzlagern, liquid-magmatischen Ni-Co-Sulfidlagern bzw. vulkano-sedimentären Sulfidlagern und oxidisch-lateritischen Nickellaterit-Lagern gewonnen, in denen es mit 0,04 ... 1 % enthalten ist. Kobalt bildet in *reduzierendem Milieu* beständige Sulfide, Selenide und Arsenide sowie in *oxidierendem Milieu* Hydroxide, Selenate, Carbonate, Sulfate und Arsenate. Co, Ni, Cu und Fe können sich in Kobaltnickelkiesen gegenseitig ersetzen.

	Granit	Basalt	Sedimentgestein	Sandstein	Tonstein	Kalkstein	Braunkohle	Braunkohlenasche
(0)	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)
Co	5/1	45/35	14	0,3/0,3	19/	0,1/0,1	3 (< 3-17)	20
4, 12					20			
Ni	8/0,5	160/150	52	9/2	68/	7/20	8 (4-28)	51
6, 21					95			
Zn	60/52	130/100	95	30/16	95/	20/20	18 ^{E.)}	100
8, 28					80			

Durchschnittliche Gehalte an Co, Ni und Zn [mg/kg] in Gesteinen, jeweils trockene Substanz.

(0)	untersuchtes Element	NG, BG – Nachweisgrenze, Bestimmungsgrenze
(1)	Granit	Vinogradov 1962 in Rösler & Lange 1975 / Taylor 1964
(2)	Basalt	Vinogradov 1962 in Rösler & Lange 1975 / Taylor 1964
(3)	Sedimentgestein	Wedepohl 1969
(4)	Sandstein	Wedepohl 1969 / Turekian & Wedepohl 1961 in Mason & Moore 1985
(5)	Tonstein	Wedepohl 1970 / V. 1962 in R. & L. 1975 (Schiefer und Tone)
(6)	Kalkstein	Wedepohl 1969 / Turekian & Wedepohl 1961 in Rösler & Lange 1975
(7)	Braunkohle (wf)	Darbinjan et al. 1987
(8)	Braunkohlenasche	Darbinjan, zusammengestellt aus Judovic et al. 1985 und Rösler & Lange 1975 in Seim & Tischendorf 1990.

A) Sand/Sandstein, Pettijohn et al. 1973, B.) Sand/Sandstein, Clarke, n=253 in Wedepohl 1967, C.) Feinkörnige Sedimente, Tissot & Welte 1978, D.) Braunkohle (waf), NL Revier, Böhmisch in Nowel et al. 1994, E.) Darbinjan, zusammengestellt aus Judovic et al. 1985 und Rösler & Lange 1975 in Seim & Tischendorf 1990.

Braunkohle (7): Dem Analysenwert liegt jeweils eine Mischprobe gesamtes Flöz zugrunde; demzufolge sind hohe Werte, wie bekannt z.B. für Schwefel und Titan im obersten Abschnitt des 2. LF „weggemittelt“.

Braunkohlenasche (8): Den Angaben ist die Annahme eines mittleren Aschegehalts zugrundegelegt. Bei Vergleichen von Elementgehalten in der Asche verschiedener Proben ist auf die gemeinsame Bezugsgröße zu achten. Das heißt, die Gehalte in der Asche sind mit dem Ascheanteil der Kohlen auf die Elementgehalte in der Kohle umzurechnen.

Kobalt ist in den Karbonatgesteinen im Vergleich zu den übrigen Eisenmetallen stark abgereichert.

Die Chlorid-, Nitrat- und Sulfatverbindungen des Kobalts sind so gut *löslich*, daß sie als Minerale nicht beständig sind.

Pedosphäre - Je nach Ausgangsgestein häufig 5 ... 15 mg/kg. Kobalt tritt in Fe-Mn-reichen Silikaten auf und ist hauptsächlich mit Fe- und Mn-Oxiden assoziiert und daher *häufig in oxidischen Horizonten angereichert*. *Co-Mangel* tritt vor allem auf sauren Sandböden auf (Podsole, saure Braunerden). Im Gegensatz zum Nickel bildet Kobalt im Anschluß an die Verwitterung *keine Residualsilikate* in Böden (vgl. Nickel-Verwitterungslagerstätten).

Hydrosphäre

Oberflächenwasser	Meerwasser	0,01 bis 4,6 µg/l, durchschnittlich 0,03 µg/l hohe Sulfidkonzentrationen bei reduzierenden Bedingungen begrenzen die Co-Konzentration im Meerwasser
	Flußwasser	Rhone 0,19 µg/l; 50 % des in Flüssen transportierten Co ist adsorptiv an Tonminerale gebunden, 20 % ionar gelöst, 30 % detritisch (Carr & Turekian 1961)
	Sickerwasser	pH < 6: Adsorptionsfähigkeit sinkt, Löslichkeit und Verfügbarkeit nehmen zu; Bodenlösungen 0,3 ... 50 µg/l pH < 5: Co ²⁺ -Ionen dominieren pH > 6: zu 90 % komplexiert durch lösliche organische Substanzen
	Grundwasser	wegen Sorption, z.B. durch Oxide nur in wenigen µg/l Trinkwasser: 0,1 ... 10 µg/l

zusammengestellt aus Merkel & Sperling 1998

Löslichkeit - Wie die Untersuchungen zur *Mobilisation* von Co infolge Pyritoxidation aus Abraummischungen von Berger 2000 zeigen, hat der pH-Wert unterhalb 3 den größten Einfluß auf die Mobilität des häufig aus dem Pyrit selbst freigesetzten Spurenelements.

Sorption – Die Mitfällung von Kobalt mit Eisen- und Mangan-Oxid bzw. die Sorption an diesen Oxiden scheint ein wichtiger Faktor bei der Begrenzung der Kobaltkonzentration in Wasser zu sein, Sperling & Merkel 1998. Dieser Effekt ist beim Erreichen des *Eisen-Hydroxidhorizonts* aus der Sickerwasserbeeinflussung des oberen Kippenabschnitts durch das aufgehende mineralisierte Kippenwasser zu erwarten.

Biologische Bedeutung - Kobalt ist essentielles Spurenelement und bildet das Zentralatom des Vitamin B12, das zur Bildung der roten Blutkörperchen notwendig ist. Für das Metall sind Dosierungen > 30 mg/Tag (100-faches der normalen Co-Aufnahme) toxisch.

Eliminierungs- und Sanierungswege – Filter mit glaukonitischem Grünsand eliminieren bei pH 3,1 ... 3,6 zwischen 94 und 99 % der Kobalt-Ausgangskonzentrationen von 0,48 bis 3,16 mg/l aus der Lösung, cit. Merkel & Sperling 1998.

Orientierungs- und Grenzwerte

- WHO: keine einschränkenden Empfehlungen,
- EU-Trinkwasserrichtlinie: Co ohne Richtwert und Maximalkonzentration,
- Trinkwasserverordnung 1990 Bundesrepublik: nicht aufgenommen.

Kobaltgehalte in der AFB-Innenkippe Seese-Ost (Anlagenband S1.6)

Die Gehalte variieren zwischen 4 und 15 mg/kg. Sie liegen unter dem Wert von im Durchschnitt 20 mg/kg für die Ton-Silt-Gesteine.

Eine Schüttungsabfolge mit durchgehend geringen Gehalten um 5 mg/kg repräsentiert die Bohrung ST10. In diesem Kippenbereich sind im oberen Vertikalabschnitt erhebliche Anteile *Geschiebemergel* enthalten, es werden Karbonatgehalte um 3 % erreicht. Die für Karbonatgesteine kennzeichnenden sehr geringen Co-Gehalte (0,1 mg/kg) „verdünnen“ hier.

Ebenfalls Geschiebemergel sind im Kippenbereich, Bohrung ST7 verkippt worden. Die Karbonatgehalte reichen bis 1,7 %. Wahrscheinlich dominiert hier der aus dem Anteil der *feinklastischen Bestandteile* des Geschiebemergel herrührende Co-Anteil in der quarzsanddominierten Abraummischung und die Co-Werte erreichen im Vergleich zu den feinkornärmeren übrigen Schüttungsteilen relativ hohe 12 ... 15 mg/kg Co.

Im Bereich der Kippe, Bohrung ST8 mit überwiegend feinsandiger Schüttung und geringem Feinkornanteil bestehen durchgehend mittlere Co-Gehalte um 8 mg/kg. Die Werte im noch feinkornärmeren Bereich, Bohrung ST15 liegen zwischen 4 und 10 mg/kg.

Kobaltgehalte in der AFB-Innenkippe Meuro (Anlagenband M1.6)

Die Kobaltgehalte reichen von 5 bis 17 mg/kg. Grundmuster der *vertikalen Veränderung der Co-Gehalte* ist ein unterer Teil der Schüttungsfolge mit Gehalten zwischen 5 und 10 sowie ein oberer Teil mit höheren Gehalten, tlw. über 15 mg/kg. Die Variation folgt i.w. der Veränderung der Kohlenstoffanteile, welche v.a. aus den oben verkippten, an kohliger Substanz reichen *Hangendschluff-Sedimenten* herrühren.

Abweichend davon bleiben die Co-Gehalte im oberen Abschnitt der Schüttung, Bohrung MT15 mit Werten um 10 mg/kg etwa auf gleicher Höhe wie im unteren Abschnitt. Wie aus den Ca-Werten ersichtlich, sind nennenswerte „Co-verdünnende“ Geschiebemergelmengen hier jedoch nicht verkippt worden. Für diesen Schüttungsabschnitt (abgesehen von der Top-Probe MT15.15) bestehen jedoch deutlich *erhöhte Gehalte an Mangan*, das im Gegensatz zur übrigen Abraummischung wahrscheinlich nicht karbonatisch assoziiert ist, möglicherweise adsorptiv an Fe-/Mn-Oxid, -hydroxid.

Nickel

Allgemeine geochemische Charakterisierung – Vorkommen in der Lithosphäre - Das *siderophile* Element der Gruppe der Eisenmetalle kann wie Kobalt in ferromagnetischen Mineralen in Eruptivgesteinen das Eisen ersetzen, am häufigsten tritt es in der 2-wertigen Oxidationsstufe auf. In der Erdkruste ist es zu durchschnittlich 150 mg/kg enthalten. Wie Kobalt tritt Nickel in *basischen und ultrabasischen Magmatiten* in deutlich höheren Konzentrationen als in sauren Magmatiten auf. Die Gehalte stammen vorwiegend aus der Verwitterung von Olivin (Mg, Fe)₂[SiO₄].

	Granit	Basalt	Sedimentgestein	Sandstein	Tonstein	Kalkstein	Braunkohle	Braunkohlenasche
(0)	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)
Co	5/1	45/35	14	0,3/0,3	19/	0,1/0,1	3 (< 3-17)	20
4, 12					20			
Ni	8/0,5	160/150	52	9/2	68/	7/20	8 (4-28)	51
6, 21					95			
Zn	60/52	130/100	95	30/16	95/	20/20	18 ^{E.)}	100
8, 28					80			

Durchschnittliche Gehalte an Co, Ni, Zn [mg/kg] in Gesteinen, jeweils trockene Substanz.

(0)	untersuchtes Element	NG, BG – Nachweisgrenze, Bestimmungsgrenze
(1)	Granit	Vinogradov 1962 in Rösler & Lange 1975 / Taylor 1964
(2)	Basalt	Vinogradov 1962 in Rösler & Lange 1975 / Taylor 1964
(3)	Sedimentgestein	Wedepohl 1969
(4)	Sandstein	Wedepohl 1969 / Turekian & Wedepohl 1961 in Mason & Moore 1985
(5)	Tonstein	Wedepohl 1970 / V. 1962 in R. & L. 1975 (Schiefer und Tone)
(6)	Kalkstein	Wedepohl 1969 / Turekian & Wedepohl 1961 in Rösler & Lange 1975
(7)	Braunkohle (wf)	Darbinjan et al. 1987
(8)	Braunkohlenasche	Darbinjan, zusammengestellt aus Judovic et al. 1985 und Rösler & Lange 1975 in Seim & Tischendorf 1990.

A.) Sand/Sandstein, Pettijohn et al. 1973, B.) Sand/Sandstein, Clarke, n=253 in Wedepohl 1967, C.) Feinkörnige Sedimente, Tissot & Welte 1978, D.) Braunkohle (waf), NL Revier, Böhmsch in Nowel et al. 1994, E.) Darbinjan, zusammengestellt aus Judovic et al. 1985 und Rösler & Lange 1975 in Seim & Tischendorf 1990.

Braunkohle (7): Dem Analysenwert liegt jeweils eine Mischprobe gesamtes Flöz zugrunde; demzufolge sind hohe Werte, wie bekannt z.B. für Schwefel und Titan im obersten Abschnitt des 2. LF „weggemittelt“.

Braunkohlenasche (8): Den Angaben ist die Annahme eines mittleren Aschegehalts zugrundegelegt. Bei Vergleichen von Elementgehalten in der Asche verschiedener Proben ist auf die gemeinsame Bezugsgröße zu achten. Das heißt, die Gehalte in der Asche sind mit dem Ascheanteil der Kohlen auf die Elementgehalte in der Kohle umzurechnen.

Bei Schwefelverfügbarkeit bildet sich Pentlandit (Fe, Ni)₉S₈, das bedeutendste Primärmineral in der Nickelgewinnung. Zu 95 % wird Nickel aus, an basische und ultrabasische Intrusionskörper gebundene *Sulfidlagerstätten* sowie oxidische und silikatische Nickel-Laterit-Verwitterungslagerstätten über Ultrabasiten gewonnen. Aus Rotnickelkies NiAs in hydrothermalen Gängen mit Ni-, Co-Arseniden und Silber.

Pedosphäre – Die Adsorption und Bindung von Ni in Böden erfolgt vor allem durch Fe-, Mn- und Al-Oxide sowie Tonminerale. Unbelastete Böden in Deutschland enthalten 5 ... 50 mg/kg Nickel.

Hydrosphäre

Oberflächennähe	Meerwasser	0,1 ... 0,6 µg/l
-----------------	------------	------------------

	Flußwasser	4 ... 14 µg/l
	Sickerwasser	3 ... 15 µg/l pH < 6: Gehalte an wasserlöslichem (ionar) und austauschbarem Ni nehmen deutlich zu, die Verlagerbarkeit und Verfügbarkeit steigt mit abnehmendem pH; pH < 7,5: in Bodenlösungen hauptsächlich als Ni ²⁺ und in organischen Ni-Komplexen
	Grundwasser	sehr leicht freigesetzt/durch Mitfällung mit Fe- und Mn-Oxiden schnell wieder festlegbar, dementsprechend nur in Spuren enthalten, 4 µg/l Zunahme infolge saurer Niederschläge und Einfluß von Deponien
	Tiefenwässer	9,4 mg/kg

zusammengestellt aus Merkel & Sperling 1998

Löslichkeit, Sorption – Ni neigt dazu, gemeinsam mit Eisen- und vor allem Manganoxiden auszufallen. Wie Kupfer tendiert Nickel dazu, mit organischen Liganden starke Komplexe zu bilden. So kann Nickel in organikreichen Böden auch bei niedrigem pH irreversibel sorbiert bleiben.

Biosphäre

Pflanze	Tier	Mensch
Ni-Salze für Pflanzen, Fische, Säugetiere rel. ungiftig, da Ni ²⁺ schlecht aufgenommen		
	Ni vermutlich am Kohlenhydratstoffwechsel beteiligt, bezüglich Wirkung zu unterscheiden zwischen löslichen, unlöslichen, organischen Verbindungen, Metallstaub	
i.d.R. < 3 mg/kg, bis 300 mg/kg (z.B. infolge Klärschlamm-Aufbringung) bei starken Toxizitätssymptomen und Ertragsdepressionen. Ni-Aufnahme bei hohen pH verhindert.	anorganische wasserlösliche Ni-Verbindungen: teratogen wirksam	auf Nickellegierungen tlw. allergische Reaktion, „Nickel dermatitis“

Eliminierungs- und Sanierungswege

- Auf Ni-reichen Böden toxische Wirkung auf Pflanzen durch Aufkalken auf pH 7 vermeidbar,
- Aus belasteten Abwässern durch Sulfidfällung mit sulfatreduzierenden Bakterien zu entfernen,
- Aus wässrigen Lösungen mit glaukonitischem Grünsand sind Ni-Konzentrationen 0,34 ... 4,2 mg/l unabhängig vom pH zu 90 % entfernbar.

Orientierungs- und Grenzwerte

- Ausbringung von Klärschlamm nicht zulässig, wenn dieser > 200 mg/kg bzw. der Boden > 50 mg/kg Ni enthält
- TrinkwV 1990 Grenzwert 0,05 mg/l
- EU Grenzwert 0,02 mg/l vorgesehen
- LAWA 1994 Grundwasser 15 ... 50 µg/l (zur Bewertung)

Nickelgehalte in der AFB-Innenkippe Seese-Ost (Anlagenband S1.6)

Die Gehalte liegen im Bereich zwischen 25 und 54 mg/kg, erreichen im Einzelfall 90 mg/kg und liegen somit unter denen durchschnittlich für Ton-Silt-Gesteine festgestellten Werten.

Die aus dem gemeinsamen Auftreten in sulfidischer Form resultierende, häufig in Gesteinen bestehende Korrespondenz zwischen *Kobalt und Nickel* mit einem Mengenverhältnis Co/Ni 1:4 ist auch in der Abraummischung Seese- Ost und Meuro zu erkennen, Abb. 6-3 und wird an der Teufenveränderung, Schüttung Bohrung ST3 besonders deutlich.

Der Bereich der *feinsandigen* Schüttung, Bohrung ST15 weist, bei einer Ausnahme (ein 5m-Intervall) durchgehend die *geringsten Ni-Gehalte, um 30 mg/kg* auf. Das für Kobalt beobachtete Zurückgehen der Gehalte in dem stärker karbonatführenden Bereich der Schüttung, Bohrung ST10 ist für Nickel nicht festzustellen. Es bestehen durchgehend mittlere Gehalte, geringfügig unter 40 mg/kg.

Nickelgehalte in der AFB-Innenkippe Meuro (Anlagenband M1.6)

Die Gehalte variieren großenteils zwischen 20 und 60 mg/kg. Es besteht eine *deutliche vertikale Veränderung* in den Schüttungsfolgen, oben dominierend 40 ... 60 mg/kg, im unteren Kippenabschnitt 20 bis 40 mg/kg. Wie für das Kobalt folgt die vertikale Veränderung dem Auftreten der i.d.R. oben verkippten Hangendschluffsedimente. Im Gegensatz zum Kobalt gilt dies auch für den Bereich der Schüttung, Bohrung MT15.

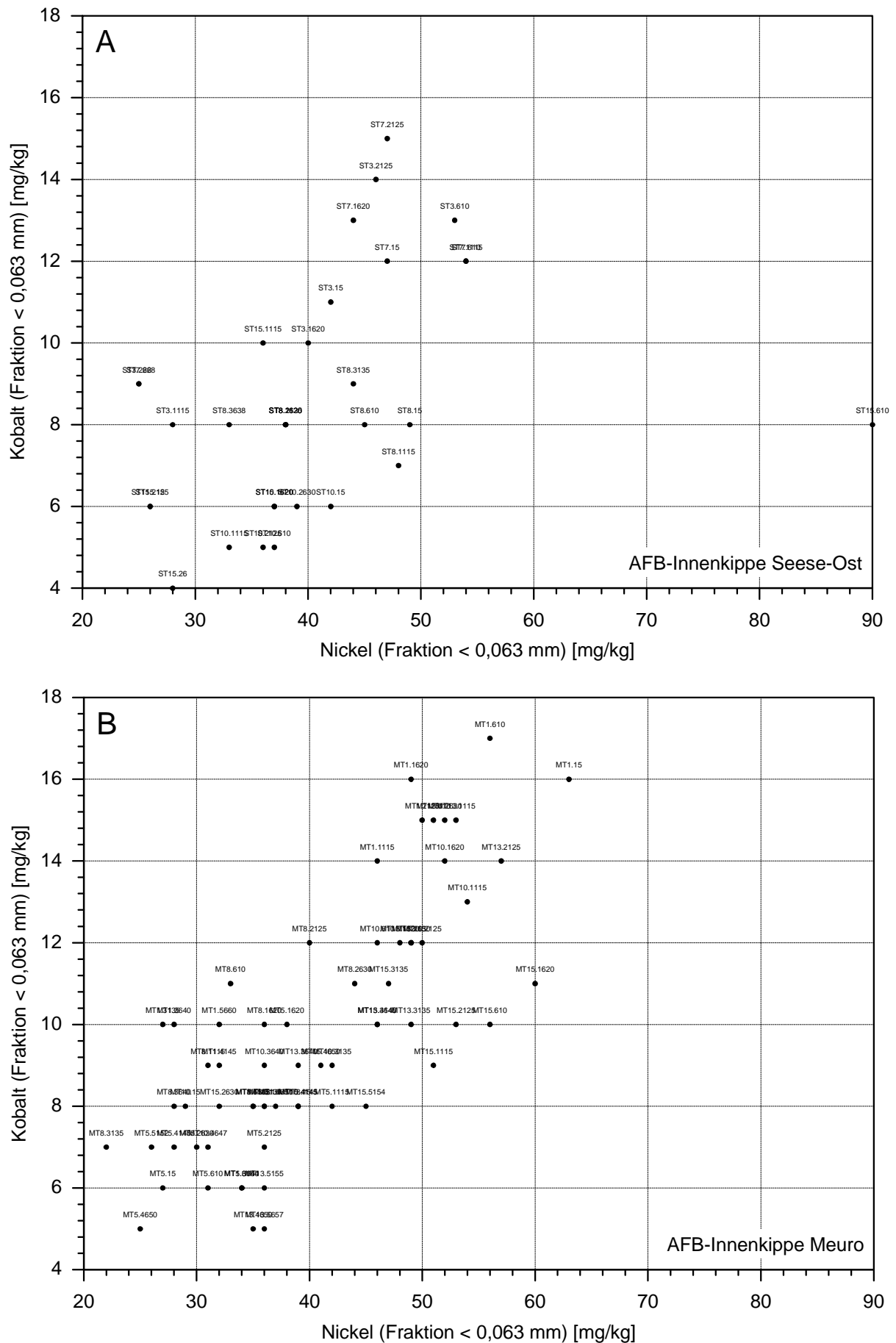


Abbildung 6-3 Gehalte Kobalt in Beziehung zum Nickelgehalt (1:4), Feinfraktion Abraummischung Tagebau Seese-Ost (A) und Meuro (B).

Zink

Allgemeine geochemische Charakterisierung – Vorkommen in der Lithosphäre - Das Schwermetall tritt in natürlichen Verbindungen stets 2-wertig auf. Das Zn^{2+} -Ion hat ähnliche Größe wie Fe^{2+} , Co^{2+} , Ti^{2+} , Ni^{2+} , aber ein bevorzugter Einbau von Zn in Minerale dieser Elemente wird nicht beobachtet. Häufig ist Zn durch Kopräzipitation mit Karbonaten fixiert, Zinkspat Smithsonit ZnCO_3 , $\text{Zn}_4[(\text{OH})_2\text{Si}_2\text{O}_7]\cdot\text{H}_2\text{O}$ in Kalkstein. In der Erdkruste ist Zink durchschnittlich zu 0,01 % enthalten, in Primärgesteinen feinverteilt als Spurenelement gesteinsbildender Minerale (Magnetit, Pyroxen, Amphibol, Biotit, Spinell, Granat, Staurolith).

Da sich Zn^{2+} amphoter verhält, existiert eine große Anzahl verschiedener Salze; Sulfate, Chloride wasserlöslich; Oxide, Karbonate, Phosphate, Silikate, organische Komplexe unlöslich.

88 % des in Lagerstätten konzentrierten Zinks treten in Sulfid-Erzkörpern, 12 % in sedimentären Lagerstätten (Karbonate, Sandsteine) auf.

	Granit	Basalt	Sedimentgestein	Sandstein	Tonstein	Kalkstein	Braunkohle	Braunkohlenasche
(0)	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)
Co	5/1	45/35	14	0,3/0,3	19/	0,1/0,1	3 (< 3-17)	20
4, 12					20			
Ni	8/0,5	160/150	52	9/2	68/	7/20	8 (4-28)	51
6, 21					95			
Zn	60/52	130/100	95	30/16	95/	20/20	18 ^{E.)}	100
8, 28					80			

Durchschnittliche Gehalte an Co, Ni, **Zn** [mg/kg] in Gesteinen, jeweils trockene Substanz.

(0)	untersuchtes Element	NG, BG – Nachweisgrenze, Bestimmungsgrenze
(1)	Granit	Vinogradov 1962 in Rösler & Lange 1975 / Taylor 1964
(2)	Basalt	Vinogradov 1962 in Rösler & Lange 1975 / Taylor 1964
(3)	Sedimentgestein	Wedepohl 1969
(4)	Sandstein	Wedepohl 1969 / Turekian & Wedepohl 1961 in Mason & Moore 1985
(5)	Tonstein	Wedepohl 1970 / V. 1962 in R. & L. 1975 (Schiefer und Tone)
(6)	Kalkstein	Wedepohl 1969 / Turekian & Wedepohl 1961 in Rösler & Lange 1975
(7)	Braunkohle (wf)	Darbinjan et al. 1987
(8)	Braunkohlenasche	Darbinjan, zusammengestellt aus Judovic et al. 1985 und Rösler & Lange 1975 in Seim & Tischendorf 1990.

A.) Sand/Sandstein, Pettijohn et al. 1973, B.) Sand/Sandstein, Clarke, n=253 in Wedepohl 1967, C.) Feinkörnige Sedimente, Tissot & Welte 1978, D.) Braunkohle (waf), NL Revier, Böhnisch in Nowel et al. 1994, E.) Darbinjan, zusammengestellt aus Judovic et al. 1985 und Rösler & Lange 1975 in Seim & Tischendorf 1990.

Braunkohle (7): Dem Analysenwert liegt jeweils eine Mischprobe gesamtes Flöz zugrunde; demzufolge sind hohe Werte, wie bekannt z.B. für Schwefel und Titan im obersten Abschnitt des 2. LF „weggemittelt“.

Braunkohlenasche (8): Den Angaben ist die Annahme eines mittleren Aschegehalts zugrundegelegt. Bei Vergleichen von Elementgehalten in der Asche verschiedener Proben ist auf die gemeinsame Bezugsgröße zu achten. Das heißt, die Gehalte in der Asche sind mit dem Ascheanteil der Kohlen auf die Elementgehalte in der Kohle umzurechnen.

Pedosphäre – 10 ... 300 mg/kg; in mäßig bis schwach sauren Böden Bindungen an organische Substanz, in alkalischen Böden Zn-Affinität zu Mn- und Fe-Oxiden. Zn-Mangel auf kalkigen Böden unter pH 7,4, da dann geringe Löslichkeit (Pflanzenverfügbarkeit).

Hydrosphäre

Oberflächenwasser	Meerwasser	ins Meerwasser gelangte Zn-Mengen fallen zu 99 % mit Tonmineralen (dazu Manganknollen, Phosphorite) aus, so daß nur 0,5 µg/l enthalten sind.
	Flußwasser	bis 10 µg/l. Unfiltriertes Rheinwasser durchschnittlich 53 µg/l, filtriertes nur 11 µg/l, was aus der Bindung an Partikel herrührt. Hohes „Selbstreinigungspotential“ von Flußwasser durch Mitfällen von Zn mit Tonmineralen und Fe- und Mn-Oxiden (vgl. Zn//Mn//Fe Abraummischung Meuro).
	Sickerwasser	pH < 6: pH 5 ... 7,5: bis 0,4 mg/l
	Grundwasser	im Mittel unter 10 µg/l geochemische Verfügbarkeit bestimmt die Zn-Konzentration (nutzbar zur Zn-Prospektion)

zusammengestellt aus Merkel & Sperling 1998

Löslichkeit, Sorption - Teilweise ersetzt Zink Fe und Mn in Silikaten (Meuro Mt 15: Zn//Mn//Fe). Die Mitfällung von Zink mit Calciumkarbonat (Foraminiferen-Schalen) legt ca. 10% des Zn-Nachschubs im Meerwasser fest. Zink wird an Mn- oder Fe-Oxiden und –hydroxiden sowie an Tonmineralen adsorbiert.

Biologische Bedeutung – für Pflanzen und Tiere ist Zn essentielles Spurenelement. Störungen des Zn-Stoffwechsels beruhen meist auf *Zn-Mangel*. Zn ist einerseits Bestandteil von Enzymen, andererseits aktiviert es andere Enzyme.

Eliminierungs- und Sanierungswege – Die Eliminierung ist mit Glaukonitsand als Filter ohne Einfluß des pH möglich.

Orientierungs- und Grenzwerte

- Ausbringung von Klärschlamm nicht zulässig, wenn dieser > 2.500 mg/kg bzw. der Boden > 200 mg/kg Zn enthält
- TrinkwV 1990 Grenzwert 5 mg/l
- LAWA 1994 Grundwasser 100 ... 300 µg/l als Prüfwert, 500 ... 2.000 µg/l als Maßnahmenswellenwert

Zinkgehalte in der AFB-Innenkippe Seese-Ost (Anlagenband S1.6)

Die Gehalte liegen zwischen 29 und 150 mg/kg, erreichen im Einzelfall 226 mg/kg. Es besteht eine nur geringe vertikale Differenzierung. In der Tendenz sind in den oberen Teilen der Abraumschüttungsfolgen die Gehalte höher, relativ deutlich in ST15 und ST8, wo im oberen Teil um 100 bzw. max. 226 mg/kg Zn erreicht werden.

Auffällig ist das Zurückgehen von Zink, Bohrung ST3 im Abschnitt mit verkipptem *Geschiebemergel*. Dies ist in den ebenfalls Geschiebemergel-beeinflussten Schüttungsbereichen, Bohrungen ST10 und ST7 mit erhöhten Karbonatgehalten nicht zu beobachten. Möglicherweise liegt ein Effekt unterschiedlicher Zn-Bindung (Karbonatminerale) gegenüber Zn (Tonminerale) vor.

Zinkgehalte in der AFB-Innenkippe Meuro (Anlagenband M1.6)

Die Gehalte variieren zwischen 20 und 270 mg/kg, wobei Werte > 100 mg/kg im wesentlichen auf den oberen Teil, Schüttungsbereich Bohrung MT15 beschränkt sind.

Nur hier ist eine *vertikale Differenzierung* mit im oberen Abschnitt der Schüttungsfolge erhöhten Zn-Gehalten ausgeprägt. Dies weist auf die untergeordnete Rolle der organischen Assoziation von Zn in der Abraummischung, kohlige Substanz der hier verkippten Hangendschluffe.

6.3 „Ton- und Glimmermineralkomponente“ – Aluminium

Allgemeine geochemische Charakterisierung - Aluminium ist das häufigste Metall in der Erdkruste (8,3 % Al). Wegen seiner großen Sauerstoffaffinität kommt es nie gediegen, sondern gebunden an Sauerstoff in Mineralen und Gesteinen vor. Aluminium gehört wie das ebenfalls auf die Verteilung in der Abraumschüttung untersuchte Titan zur Gruppe der *lithophilen Elemente* ($-SiO_4$).

Die weite Verbreitung als Mineralbestandteil ist auf die geringe Größe des Aluminium-Ions und somit Fähigkeit, das *Zentralion* in tetraedrischen und oktaedrischen Strukturen zu stellen, zurückzuführen. Die Alumosilikate (Aluminosilikate), für welche die teilweise Substitution von Si^{4+} durch Al^{3+} kennzeichnend ist, zählen zu den *wichtigsten gesteinsbildenden Mineralen*. Der notwendige Ladungsausgleich wird durch Aufnahme von Kationen wie das K^{+} -Ion erreicht.

Vorkommen im verkippten Abraum - In den verkippten Flöz-Deckgebirgsschichten des *Tertiär und Quartär der Niederlausitz* sind *Ton- und Glimmerminerale* die hauptsächlichen Aluminiumminerale. Tonmineralpartikel gelangen als klastischer Eintrag in das *tertiäre Kohlenmoor* und sind Bestandteil der Kohle bzw. der kohligen Substanz (aufgearbeitete Flözkohle) im Flöznebergestein (Hangendschluff, Zwischenmittel). Von den pleistozänen Ablagerungen des *Quartär* sind vor allem Bändertone und Geschiebemergel tonmineral-führend. Miozäne Sedimente der Niederlausitz enthalten fast rein kaolinitisch-illitische Tone, Rösler et al. 1978.

Kaolinit $\text{Al}_4[(\text{OH})_8\text{Si}_4\text{O}_{10}]$	Illit $\text{KAl}_2(\text{OH}, \text{F})_2[\text{AlSi}_3\text{O}_{10}]$	Montmorillonit $(\text{Al}_{1,67}\text{Mg}_{0,33})[(\text{OH})_2/\text{Si}_4\text{O}_{10}]_0,33\text{-Na}_{0,33}(\text{H}_2\text{O})_4$	Chlorit $(\text{Mg}, \text{Fe}, \text{Al})_6(\text{Si}, \text{Al})_4\text{O}_{10}(\text{OH})_8$
49	48	2	1

Relative Tonmineralgehalte in % ($\Sigma \text{TM}=100\%$), Lausitzer Untersuchungsgebiet, Rösler et al. 1978

Die vor allem in den Hangendschluffsedimenten enthaltenen Glimmer gehören nach qualitativer XRD-Analyse zur *Muscovit-Gruppe*, chemisch zusammengesetzt wie Illit. Andere Aluminiumminerale kommen nur untergeordnet vor. Die Erhaltungsfähigkeit der *Feldspäte* beim Transport aus dem kristallinen Abtragungsgebiet im Süden ist gering. Vielmehr wurde das bei der Verwitterung von Feldspat unter warmhumidem Klima freigesetzte Aluminium überwiegend in situ wieder ausgefällt, meist in Form von *Kaolinit*, der zum Teil erodiert und bis in die Kohlenmoore verfrachtet wurde.

Stellvertretend für die *Ton- und Glimmermineralführung* und zur Bewertung der im künftigen schwefelsauren Milieu der Abraumschüttung hieraus *freisetzbaren Aluminiummengen*, wurde die Verteilung der Gehalte in den Kippenkörpern bestimmt. Die Aluminiumgehalte in den zum Vergleich angeführten Sedimentgesteinsgruppen und Braunkohle zeigen die Anreicherung in den *Tongesteinen* und den aus der engen Verbindung zwischen Kohle, kohliger Substanz und Tonmineralen resultierenden hohen Aluminiumwert der *Braunkohlenasche*.

	Granit	Basalt	Sedimentgestein	Sandstein	Tonstein	Kalkstein	Braunkohle	Braunkohlenasche
(0)	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)
Al	77.000/-	87.600/-	-	-/25.000	-/104.500	-/4.200	9.000	98.000

Durchschnittliche Aluminiumgehalte [mg/kg] in Gesteinen, jeweils trockene Substanz.

(0)	untersuchtes Element	NG, BG – Nachweisgrenze, Bestimmungsgrenze
(1)	Granit	Vinogradov 1962 in Rösler & Lange 1975 / Taylor 1964
(2)	Basalt	Vinogradov 1962 in Rösler & Lange 1975 / Taylor 1964
(3)	Sedimentgestein	Wedepohl 1969
(4)	Sandstein	Wedepohl 1969 / Turekian & Wedepohl 1961 in Mason & Moore 1985
(5)	Tonstein	Wedepohl 1970 / V. 1962 in R. & L. 1975 (Schiefer und Tone)
(6)	Kalkstein	Wedepohl 1969 / Turekian & Wedepohl 1961 in Rösler & Lange 1975
(7)	Braunkohle (wf)	Darbinjan et al. 1987
(8)	Braunkohlenasche	Darbinjan, zusammengestellt aus Judovic et al. 1985 und Rösler & Lange 1975 in Seim & Tischendorf 1990.

A.) Sand/Sandstein, Pettijohn et al. 1973, B.) Sand/Sandstein, Clarke, n=253 in Wedepohl 1967, C.) Feinkörnige Sedimente, Tissot & Welte 1978, D.) Braunkohle (waf), NL Revier, Böhlnisch in Nowel et al. 1994, E.) Darbinjan, zusammengestellt aus Judovic et al. 1985 und Rösler & Lange 1975 in Seim & Tischendorf 1990.

Braunkohle (7): Dem Analysenwert liegt jeweils eine Mischprobe gesamtes Flöz zugrunde; demzufolge sind hohe Werte, wie bekannt z.B. für Schwefel und Titan im obersten Abschnitt des 2. LF „weggemittelt“.

Braunkohlenasche (8): Den Angaben ist die Annahme eines mittleren Aschegehalts zugrundegelegt. Bei Vergleichen von Elementgehalten in der Asche verschiedener Proben ist auf die gemeinsame Bezugsgröße zu achten. Das heißt, die Gehalte in der Asche sind mit dem Ascheanteil der Kohlen auf die Elementgehalte in der Kohle umzurechnen.

Organische Komplexbildner wie Humin- und Fulvosäuren der Braunkohle in der Abraumschüttung können durch Chelatbildung Aluminium komplexieren, das im Austauscher- und Pufferbereich gelöst wurde. Der verbleibende Anteil an schnell reagierendem „ökotoxisch“ wirksamen mononuklearen Aluminium macht nach Matthes

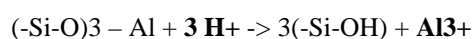
1988a lediglich 5-20 % aus. Inwieweit dies auch bei den freigesetzten Mengen Aluminium infolge Versauerung durch „Pyritoxidation“ zutrifft, ist nicht bekannt.

Eine bereits bei *Entstehung* der Kohle aufgenommene Menge Aluminium kann in Form von Fe-Al-Ca-Humat gebunden sein, Darbinjan 1989.

Hydrosphäre - Unter den Bedingungen der Erdoberfläche und bei neutralem pH sind Aluminiumverbindungen wenig löslich. Die geringe geochemische Beweglichkeit kommt in den sehr geringen Gehalten von Meerwasser mit 0,013 bis 0,97 µg/l und einer mittleren Verweilzeit des Aluminium von nur 150 Jahren zum Ausdruck. In *Oberflächengewässern* (Süßwasser) sind bei neutralem pH zwischen 1/100 bis wenige 1/10 mg/l Aluminium enthalten, Merkel & Sperling 1996. Für ~ pH-neutrale Grundwässer gelten Gehalte gleicher Größenordnung.

6.3.1 Ton- und Glimmerminerale unter Säureeinwirkung – Tone als Ionenaustauscher, Zwischenpuffer

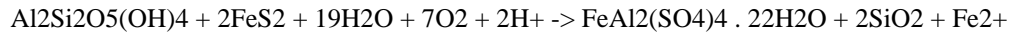
Unter Einwirkung schwefelsaurer Lösung ist mit der *Freisetzung von Aluminium*, vor allem aus den Schichtsilikaten zu rechnen, Kerth & Wiggering 1991. Eine verstärkte Mobilisierung von Aluminium aus dem Kristallgitter von Silikatmineralen findet bei Fehlen von Karbonatpuffer *unterhalb pH 4,2* statt. Die Freisetzung von Al^{3+} (Aluminisierung) entspricht einer Protolyse, z.B. der Tonminerale



Die in sauren Wässern erhöhte Löslichkeit des Aluminiums (oberhalb pH 5 begrenzt die Bildung des nur zu 3µg/l löslichen Gibbsit das gelöste Aluminium) führt dazu, daß Aluminium überwiegend als hydratisiertes Ion $[\text{Al}(\text{OH}_2)_6]^{3+}$ vorliegt. Der Sauerstoff dieses Ions wird von den kleinen, hochgeladenen Al^{3+} so stark polarisiert, daß Protonen hydrolytisch dissoziieren, die Ladung des hydratisierten Ions sinkt und es als *Kationensäure* sauer reagiert.

Wiese et al. 1987 finden bei der Untersuchung von Faktoren bei der „Pyritoxidation“ unter „sehr geringen Sauerstoff-Partialdrucken“ Hinweise auf die Bedeutung der *Tonminerale* bei dieser Reaktion. Sie beobachten mit Hilfe der REM aluminiumhaltige Eisenhydratsulfate auf Eisensulfid in Kohle, eng mit Tonmineralen „verwachsen“ und schlußfolgern, daß die Tonminerale auf zweierlei Weise an der Versauerungsreaktion beteiligt sind:

- 1.) durch die hygroskopische Eigenschaft der Tonminerale wird Wasser fein verteilt an den Reaktionsorten, dem in der Kohle feinverteilten Eisensulfid bereitgehalten katalytisch wirksam
- 2.) Tonmineral Kaolinit (Herkunft des Al) beteiligt an Reaktion zu Halotrichit



Bei Untersuchungen zur Verwitterung unter dem Einfluß der Luftfeuchtigkeit stellte Borek 1994 fest, daß die „Pyritoxidation“ am schnellsten bei Vorhandensein von Kaolinit in Kombination mit Braunkohle abläuft.

Im wesentlichen kommen die *Tonminerale* als *Ionenaustauscher* in der Abraummischung in Betracht. Der *Kationenbelag* auf der negativ geladenen Tonmineraloberfläche ist bis zu einem bestimmten Grad frei beweglich und gegen Ionen aus dem künftigen „Kippengrundwasser“ austauschbar. Tonminerale können die bei der „Pyritoxidation“ mobilisierten Metall-Kationen binden und vor der Verlagerung ins Grundwasser zurückhalten. Die Wirksamkeit der Tonminerale als Austauscher wird durch den pH-Wert beeinflusst. Bei hoher H^+ -Ionenkonzentration ($\text{pH} < 3$) wird das H^+ -Ion im Bereich der variablen Ladung des Tonminerals (an den Kanten) *gegenüber anderen Kationen bevorzugt*. Die Tonminerale wirken als *Austauschpuffer*, ermöglichen also nur eine Zwischenspeicherung der H^+ , Kölling 1990.

Die Anzahl der verfügbaren negativen Ladungsstellen sinkt bis auf den Wert der permanenten Ladung des Tonminerals, die aus dem isomorphen Ersatz von Si^{4+} durch Al^{3+} resultiert.

In sauren Grundwässern wurde bis 20 mg/l gelöstes Aluminium bestimmt, Merkel & Sperling 1996. Geogener Normalbereich für Lockersedimente ist $< 0,01\text{-}0,04$ mg/l, Merkel & Sperling 1996. Im Durchschnitt 10 mg/l Aluminium bei pH 3,0-3,1 bestimmten Fischer et al. 1998 im Braunkohlentagebau-Restlochsee Heide VI, Niederlausitz und führen diese Gehalte auf „intensive Silikatverwitterung bei der Passage des sauren Grundwassers im Kippenbereich“ zurück. Im Kippengrundwasser der Altkippe Berrenrath, Rheinisches Braunkohlenrevier fand Wisotzky 1994 zwischen 0,3 und 24 mg/l Aluminium gegenüber $< 0,05$ mg/l im Vorfeld.

Gast & Katzur 1996 verglichen die Zusammensetzung des Grundwassers im Anstrombereich im *Vorfeld* der Kippen und innerhalb der *AFB-Innenkippen* der Schlabendorfer und Seeser Felder. Nach 400 m Kippenpassage in der *relativ jungen* AFB-

Innenkippe Schlabendorf-S (1975-1991) fanden sie 0,68 mg/l Al^{3+} im Vergleich zu 0,03 mg/l im Anstrom.

Sulfathaltige saure Wässer und Aluminiumsilikate - In *sulfatführenden sauren Wässern*, wie sie aus den Reaktionsprodukten der „Pyritoxidation“ und dem aufgehenden Grundwasser resultieren, kann die Aluminiumlöslichkeit durch die Bildung von Aluminiumsulfaten und Aluminiumhydrosulfaten begrenzt werden, Merkel & Sperling 1996.

Aluminiumhydrosulfate (Alaune) werden häufig auf disulfid- und tonmineralführenden Ablagerungen beobachtet, Rösler 1991. Sie sind bei Luftzutritt als natürliches *Verwitterungsprodukt durch das Einwirken saurer Sulfatlösungen auf Aluminiumsilikate* entstanden.

Mineral	chem. Formel		Entstehung – Vorkommen
Aluminit	$\text{Al}_2[(\text{OH})_4/\text{SO}_4] \cdot 7\text{H}_2\text{O}$		Einwirken Sulfatlösungen auf Al-Silikate
Alunogen	$\text{Al}_2[\text{SO}_4]_3 \cdot 18\text{H}_2\text{O}$		Einwirken von Sulfatlösungen auf Al-haltige Minerale in Kohlenflözen, Schiefertönen und Schiefern, die Pyrit oder Markasit führen
Kalialaun	$\text{KAl}[\text{SO}_4]_2 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$	leicht in Wasser löslich, 150 g/l	aus schwefelkieshaltigen bis –reichen Sedimentgesteinen bei Verwitterung, so aus Tonen, Tonschiefern, Schwarzschiefern (<i>Alaunschiefern</i>) und <i>Braunkohlen</i>
Halotrichit	$\text{FeAl}_2[\text{SO}_4]_4 \cdot 22\text{H}_2\text{O}$	leicht in Wasser löslich	Verwitterungsprodukt von Schwefelkiesen, z.B. in Erzlagerstätten, Braunkohle, pyrithaltigen Schiefern

Biologische Bedeutung - Aluminium ist kein lebensnotwendiges Element. Die infolge der Versauerung in Wässern existierenden freien Al-Ionen wirken auf Lebewesen toxisch.

Mensch	Tier	Pflanze
neurotoxisch, zerebrale Schäden (Alzheimer) Grenzwert Deutsche Trinkwasserverordnung 0,2mg/l	Al hemmt wichtige Enzyme 2 mg/l tödlich auf Süßwasserfische	Al^{3+} verdrängt Ca^{2+} , Mg^{2+} ; die Symptome entsprechen Folgen von Ca-, Mg-Mangelerscheinungen wie Gelbfärbung Blätter/Nadeln

6.3.2 Aluminiumgehalte - Spülbohrungen

Entsprechend der Bedeutung der Schichtsilikate (Al in Substitution von Si) in der *Korngrößenfraktion* $< 0,063 \text{ mm}$, konnte der Zusammenhang zwischen Aluminium und Feinkornanteil genutzt werden, um Näherungswerte für Aluminium der Spülbohrungen anzugeben, in denen die Feinkornanteile mit Hilfe des GR-Log ermittelt wurden.

Im Fall Seese-Ost ist der Zusammenhang zwischen dem petrographischen und stofflichen Merkmal ohne, im Fall Meuro mit geringen Einschränkungen nutzbar, Abbildung 6-4. Für die Abraummischung *Seese-Ost* weist der Korrelationskoeffizient $> 0,9$ die geringen Störeinflüsse aus. Hierfür in Frage kommende feinputikuläre Kohle, kohlige Substanz ist in der Abraummischung Seese-Ost wenig enthalten.

In der Abraummischung *Meuro* ist besonders durch die mächtigen Hangendschluff-Sedimente in Mengen *feinkörnige kohlige Substanz* enthalten, welche die einfache lineare Beziehung zwischen *Aluminium* und *Feinkornanteil* stört.

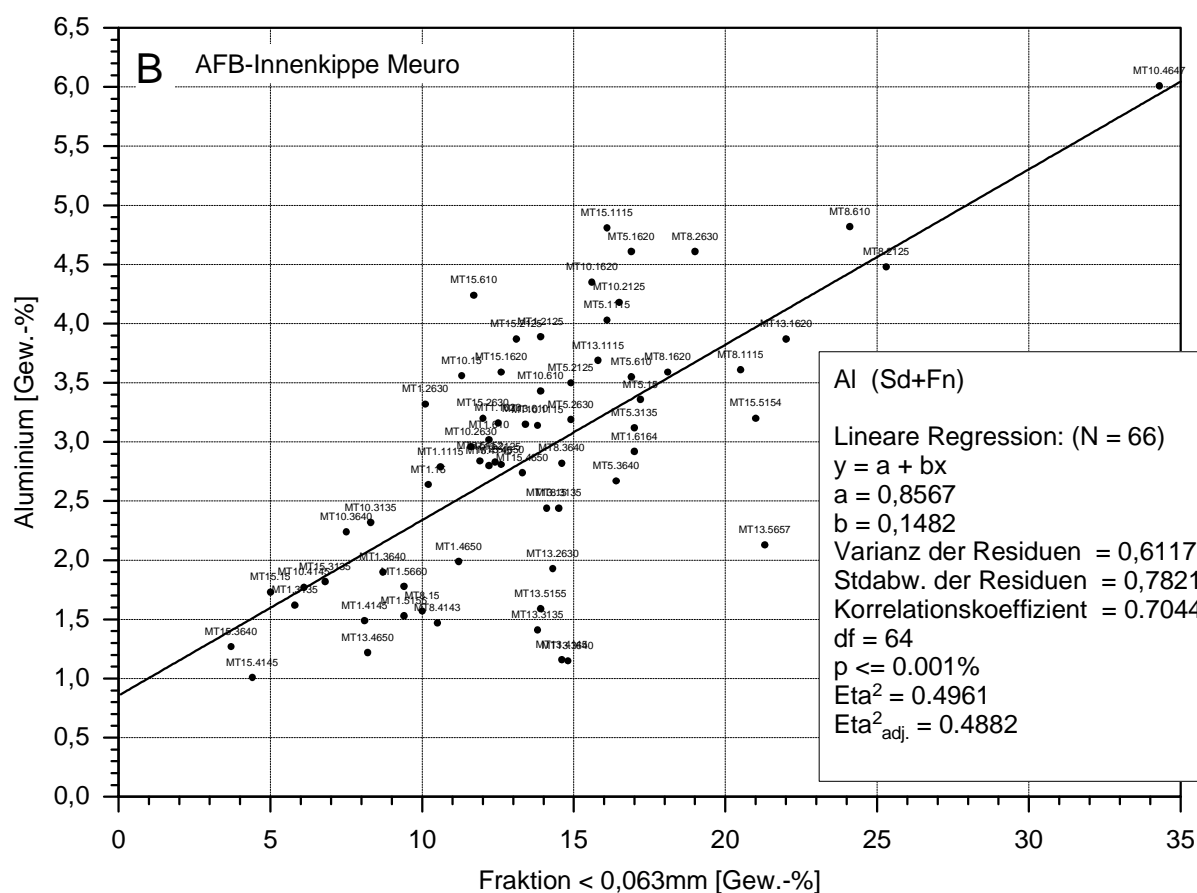
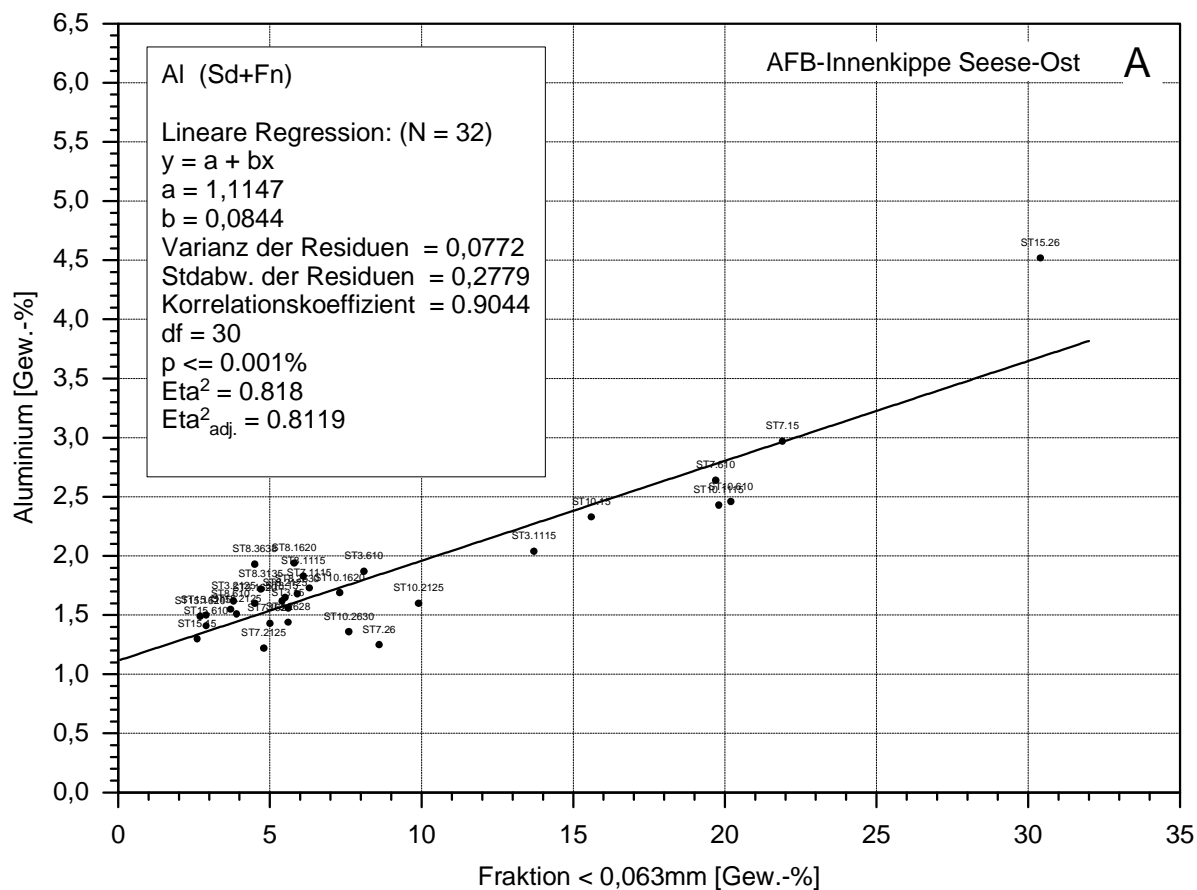


Abbildung 6-4 Gehalte Aluminium in Beziehung zum Feinfraktionsanteil, Abraummischung Tagebau Seese-Ost (A) und Meuro (B).

6.3.3 Verteilung von Aluminium im Abraummischungskörper Seese-Ost

(Anlagenheft). Die Aluminiumgehalte variieren von unter 1,5 % im drehpunktnahen Kippenbereich, Bohrungen SS1 und SS11 bis zu Werten um 3 % vor allem im oberen Vertikalabschnitt der Schüttung, Schwenkende, nordöstlicher Teilbereich des Kippenmassivs, ST7 und ST10, PS 8. Die *Wertebereichseinteilung* zur Profilschnittkonstruktion ist für die Abraummischung Seese-Ost (0-1), (1-1,75), (1,75-2,25), (2,25-3) % Al.

Aluminiumgehalte *kleiner 1,75 %* sind charakteristisch für den *unteren Abschnitt* der Abraumsedimentschüttung. Relativ geringe Gehalte (0 bis 1,75 %) über nahezu die gesamte Schüttungsmächtigkeit treten im *Drehpunktbereich*, SS1 und SS11 sowie im südlichen Schwenkende, Bohrung ST15, PS (8) – (8) (N – S) auf.

Mittlere Werte von *1 bis 2,25 %* Aluminium sind für die Schüttung im Kippenbereich „*mittleres Strossendrittel*“ zwischen D.P. und Schwenkende kennzeichnend, PS (4) – (4) (N – S) und in der (W – E) Entwicklung der PS 1 und 5. Abweichend davon sind Aluminiumgehalte *bis 3 %* in diesem Kippenbereich im oberen Teil, Bohrung SS5 anzutreffen und im übrigen beschränkt auf den *oberen Teil der Schüttungsfolge im Schwenkende* des Tagebaus, PS (8) – (8) (N – S).

Eine systematische *Zunahme des Aluminiumgehalts* vom D.P.-Bereich zum stark bindigen Schwenkende wird deutlich in den (W – E) Profilschnitten (1) und 5. Vom Kippenbasisbereich ausgehend ist bei 45 bis 55 m NN ein *gravierender Anstieg* des Aluminiumgehalts festzustellen, besonders markant bei den Schüttungsbereichen Bohrungen ST3, SS5, ST7 und ST10 im mittleren Strossendrittel und Schwenkende.

Ursache besonders der mächtigen oberen Schüttungsfolgen mit Gehalten um 3 % Aluminium ist die Tonführung der Geschiebemergel (Pleistozän). Ton- bzw. Glimmermineral-führendes Sediment des tertiären Deckgebirges, das als Träger für Aluminium in den Abraumschüttungsmassen in Frage kommt, sind ausgehaltene Flöz-Zwischenmittel (im drehpunktnahen Strossendrittel nicht ausgehalten) sowie der durchschnittlich ca. 1,5 m mächtige Flöz-Hangendschluff.

Die Änderungen des Aluminiumgehalts, vertikal und lateral innerhalb des Kippenmassivs sind so zu charakterisieren: Tendenziell steigen die Gehalte zum Schwenkende und zum Hangenden der Schüttungsfolgen an, teilweise mit einer deutlichen 2-Teilung im Vertikalprofil. Ein gering aluminiumführender unterer Teil (Vorkippe) wird überlagert von der Hauptkippe mit bis 3 % Al.

6.3.4 Verteilung von Aluminium im Abraummischungskörper Meuro

(Anlagenheft). In der Abraummischung Meuro erreichen die Aluminiumgehalte in Teufenabschnitten über 25 m Werte größer 4 Gew.-%. In der gegenüber Seese-Ost aluminiumreicheren Schüttung Meuro wird in die *Wertebereiche* (1-3), (3-4), (4-5), (5-6) % Aluminium eingeteilt.

Die (S – N) Profilschnitte 4 und 6 zeigen die Änderung von Schüttungsfolgen mit überwiegend zwischen 1 und 4 % Aluminium im *Süden* über 4 bis 6 % Al in der Schüttung im *Zwischenbereich* zu wiederum „nur“ in geringmächtigen Abschnitten bis 4 % im *Schwenkende, nördlicher Tagebaurand*. In diesem nördlichen Kippenbereich werden über 20 m mächtige Abraummassen mit weniger als 2 % Al angetroffen.

Grundtendenz für die vertikale Veränderung des Aluminiumgehalts ist die *Zunahme zum Hangenden*. Der Unterschied zwischen dem unteren aluminiumärmeren Abschnitt der *Vorkippe* und auflagernder *Hauptkippe* ist deutlicher ausgeprägt in den nördlichen Schüttungsteilen und im östlichen Schwenkende-Bereich, Bohrung MT 8, vgl. PS 4, 6 und 10.

Über die unterschiedlich deutliche *2-Teilung* der Abraumschüttungsfolge hinaus ist bei den Bohrungen MS7 (zurückgehender Aluminiumgehalt im zentralen Teufenabschnitt), MT13, MS14, MT15 auch eine *3-Teilung* nach Vertikalverlauf Aluminiumgehalt erkennbar.

Als *Träger* der Aluminiumgehalte Abraummischung Meuro kommen in Frage: der bis 11 m mächtige Hangendschluff, verkippt in den mächtigen *oberen Kippenabschnitt*, „liegendegebliebener Hangendabraum“ aus Hangendschluff, verbracht an die *Basis der Vorkippe*, Flaschenton des tertiären Deckgebirges, sowie im nördlichen Randbereich der Kippe Geschiebemergel. Da dort kein Vorschnitt erfolgte, konnten mit der Abraumförderbrücke die pleistozänen Deckgebirgssedimente in die AFB-Innenkippe gelangen.

6.3.5 Titan

Allgemeine geochemische Charakterisierung - Titan ist das neunthäufigste Element der Erdkruste (0,35 % Ti). Durchschnittlich ist es mit 4.400 mg/kg in Magmatiten enthalten, angereichert gegenüber den hellen (sialischen) Magmatiten ist es in dunklen (mafischen) Magmatiten mit 18.000 mg/kg. Titan ist ein *lithophiles Element* (-SiO₄) und tritt, meist vierwertig in Oxiden und Silikaten auf. An der Erdoberfläche, sowie im Boden haben sich die *verwitterungsresistenten Titanoxide*, i.w. Rutil TiO₂ und Ilmenit FeTiO₃ angereichert.

	Granit	Basalt	Sedimentgestein	Sandstein	Tonstein	Kalkstein	Braunkohle	Braunkohlenasche
(0)	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)
Ti	2.300/-	9.000/-	-	-/1.500	-/4.500	-/400	500	2.600
							(80-8.100)	

Durchschnittliche Titangehalte [mg/kg] in Gesteinen, jeweils trockene Substanz.

(0)	<i>untersuchtes Element</i>	NG, BG – Nachweisgrenze, Bestimmungsgrenze	
(1)	<i>Granit</i>	Vinogradov 1962 in Rösler & Lange 1975 /	Taylor 1964
(2)	<i>Basalt</i>	Vinogradov 1962 in Rösler & Lange 1975 /	Taylor 1964
(3)	<i>Sedimentgestein</i>	Wedepohl 1969	
(4)	<i>Sandstein</i>	Wedepohl 1969	/
(5)	<i>Tonstein</i>	Wedepohl 1970	/
(6)	<i>Kalkstein</i>	Wedepohl 1969	/
(7)	<i>Braunkohle (wf)</i>	Darbinjan et al. 1987	Turekian & Wedepohl 1961 in Mason & Moore 1985 V. 1962 in R. & L. 1975 (Schiefer und Tone)
(8)	<i>Braunkohlenasche</i>	Darbinjan, zusammengestellt aus Judovic et al. 1985 und Rösler & Lange 1975 in Seim & Tischendorf 1990.	

A.) Sand/Sandstein, Pettijohn et al. 1973, B.) Sand/Sandstein, Clarke, n=253 in Wedepohl 1967, C.) Feinkörnige Sedimente, Tissot & Welte 1978, D.) Braunkohle (waf), NL Revier, Böhmisches in Nowel et al. 1994, E.) Darbinjan, zusammengestellt aus Judovic et al. 1985 und Rösler & Lange 1975 in Seim & Tischendorf 1990.

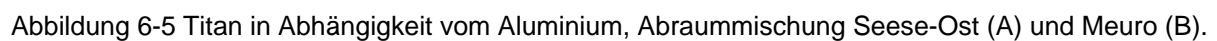
Braunkohle (7): Dem Analysenwert liegt jeweils eine Mischprobe gesamtes Flöz zugrunde; demzufolge sind hohe Werte, wie bekannt z.B. für Schwefel und Titan im obersten Abschnitt des 2. LF „weggemittelt“.

Braunkohlenasche (8): Den Angaben ist die Annahme eines mittleren Aschegehalts zugrundegelegt. Bei Vergleichen von Elementgehalten in der Asche verschiedener Proben ist auf die gemeinsame Bezugsgröße zu achten. Das heißt, die Gehalte in der Asche sind mit dem Ascheanteil der Kohlen auf die Elementgehalte in der Kohle umzurechnen.

Vorkommen in der Abraummischung - Schlecht lösliche, immobile Titanverbindungen (Ti-Oxide) der Ausgangsgesteine reichern sich *residual in Verwitterungslagerstätten* wie denen des Kaolin an. In den Ausgangsgesteinen enthaltener Biotit und Pyroxen mit Ti^{4+} für Al^{3+} werden dabei gelöst, hydrolysiert transportiert und als Titandioxide ausgeschieden. „Titan bleibt in Form selbständiger Mineralphasen im Kaolinprofil fixiert“, Lasch 1978. Die Titangehalte können Werte erreichen, die eine wirtschaftliche Verwendung von Kaolinlagerstätten für die Titangewinnung zulassen.

Kaolinlagerstätten entstanden auf den zur Braunkohlenbildungszeit unter vollhumidem Klima intensiv chemisch verwitternden *Granitflächen im Süden* der heutigen Kohleflözverbreitung. Sie sind Liefergebiet des in der Tonmineralfraktion *der Kohle und kohligen Substanz* im Niederlausitzer Braunkohlenrevier überwiegenden Tonminerals *Kaolinit*. Kaolinit als detritische Komponente in Schüttungen aus dem *südlich gelegenen Festland*, Rösler & Starke 1978. Möglicherweise ist die im Vergleich zu Seese-Ost besonders enge Korrelation zwischen Titan- und Aluminiumgehalten Ausdruck der Nähe dieses Tagebaus zum Kaolinit-Liefergebiet, Abbildung 6-5. In Frage kommt für die Herkunft des Titan auch *Titanaugit* der Basalte im tertiärzeitlichen Verwitterungs- und Abtragungsgebiet im Süden. In $CaMg[Si_2O_6]$ sind bis 4,4 % Ti enthalten, Rösler & Lange 1975.

Geochemische Untersuchungen glazialer Ablagerungen zeigen, daß tonreiche Moränensedimente in an Tonminerale gebundene Elemente Kalium, Aluminium, Eisen und Titan angereichert sind, Ehlers 1994. Kaolinit und Illit gelangen als häufigster Bestandteil der Tonmineralfraktion von Geschiebemergel in den Abraum. Illit enthält bis 1,3 % Titan, Rösler & Lange 1975.



Nach XRD für die Mineralzusammensetzung der Fraktion < 0,63 mm sowie Magnesiumgehalten unter der Nachweisgrenze (0,11 %) bzw. Bestimmungsgrenze (0,38 %) tritt Biotit im Sediment der untersuchten AFB-Innenkippen Seese-Ost und Meuro kaum auf. Der Erhalt des verwitterungsanfälligen Minerals beim Transport aus den südlichen Abtragungsgebieten in den Kohlebildungsraum ist unwahrscheinlich, Lasch 1978.

Titangehalte – Überwiegend liegen die Titangehalte in der Abraummischung *Seese-Ost* zwischen 0,05 und 0,16 Gew.-% (500-1.600 mg/kg), bei der Kippenbasisprobe ST15.26 mit Liegendschluffanteil werden 0,29 % erreicht, Anlagenband S1.4. In der Abraummischung *Meuro* mit hohen Schluffanteilen liegen die Titangehalte höher, überwiegend zwischen 0,07 und 0,27 Gew.-%, bei der Kippenbasisprobe MT 10.4647 mit Liegendschluffanteil werden 0,37 % erreicht, Anlagenband M1.4.

Die Titangehalte der Abraummischung *Seese-Ost* liegen leicht *unterhalb* der für Sandstein angegebenen 1.500 mg/kg, die Gehalte in *Meuro*, insbesondere die oberen Kippenbereiche mit Hangendschluff, erreichen annähernd den doppelten Wert. Da der *Abraum in den Kippenkörpern als Mischung vorliegt*, liegen jedoch die Gehalte auch in der relativ Ti-reichen Abraumschüttung *Meuro unterhalb* der für *Schiefer + Tone (Tonschiefer)* angegebenen 4.500 (4.600) mg/kg.

Die *vertikale und laterale Änderung der Titangehalte* folgt weitgehend der des Aluminium; Ti [%] entspricht etwa 1/15 Al [%].

Löslichkeit, Verhalten in der Hydrosphäre und bei pH-Änderungen - Die *geringe Löslichkeit* in Wasser ist Hauptgrund für die residuale Anreicherung der Titanoxide. Unterhalb von pH 3 werden auch die sehr verwitterungsresistenten Titanoxide meßbar gelöst, Marshall & Fairbridge 1999. Pulver aus Anatas ist schwach löslich in Schwefelsäure, Gmelin 1974.

Biologische Bedeutung - Titan gilt umweltgeochemisch derzeit als unbedenklich. Für das *Element* bzw. in Lösung gehende *ionare Bestandteile* und in komplexierter Form sind *keine schädlichen Wirkungen* im Falle des zusätzlichen Eintrags ins Grundwasser bzw. Trinkwasser bekannt.

Titanverbindungen des Bodens scheinen bei Leguminosen die Bildung von Wurzelknöllchen und damit die *Bindung von atmosphärischem Stickstoff* zu begünstigen, Gmelin 1974.

6.4 „Kalkkomponente“ (Karbonat) – Calcium

Allgemeine geochemische Charakterisierung - Calcium gehört zu den *lithophilen Elementen*, die bei der „ersten chemischen Sonderung der Erde“ in die Silikatminerale (SiO_4) der primären magmatischen Gesteine eingebaut wurden. Calcium, vom Lateinischen *calx* für Kalk ist mit 3,6 Gew.-% fünfthäufigstes Element der Erdkruste, konzentriert mit 3,7-6,7 % Ca in der unteren Kruste. *Kalk* gehört zu den Substanzen, die nur schwer mit „Wasser oder Feuer“ reagieren und entsprechend einem frühen Einteilungsprinzip der chemischen Stoffe als *Erden* bezeichnet wurden. Das *Erdalkalielement* Calcium bildet als Salze typischerweise *alkalisch* reagierende Lösungen.

Mit den zwei s-Außenelektronen, beide mit vergleichbar geringer Ionisationsenergie und geringer Elektronegativität geht Calcium leicht *Ionenbindungen* ein. Calcium tritt grundsätzlich als Ca^{2+} in *schwer löslichen Verbindungen*, v.a. Karbonaten, Sulfaten, Silikaten, Phosphaten und Fluoriden auf.

	Granit	Basalt	Sedimentgestein	Sandstein	Tonstein	Kalkstein	Braunkohle	Braunkohlenasche
(0)	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)
Ca	15.800/-	67.200/-	-	-/39.100	-/25.300	-/302.300	22.000	86.000

Durchschnittliche Calciumgehalte [mg/kg] in Gesteinen, jeweils trockene Substanz.

(0)	untersuchtes Element	NG, BG – Nachweisgrenze, Bestimmungsgrenze	
(1)	Granit	Vinogradov 1962 in Rösler & Lange 1975 /	Taylor 1964
(2)	Basalt	Vinogradov 1962 in Rösler & Lange 1975 /	Taylor 1964
(3)	Sedimentgestein	Wedepohl 1969	
(4)	Sandstein	Wedepohl 1969	/
(5)	Tonstein	Wedepohl 1970	/
(6)	Kalkstein	Wedepohl 1969	/
(7)	Braunkohle (wf)	Darbinjan et al. 1987	Turekian & Wedepohl 1961 in Rösler & Lange 1975
(8)	Braunkohlenasche	Darbinjan, zusammengestellt aus Judovic et al. 1985 und Rösler & Lange 1975 in Seim & Tischendorf 1990.	

A.) Sand/Sandstein, Pettijohn et al. 1973, B.) Sand/Sandstein, Clarke, n=253 in Wedepohl 1967, C.) Feinkörnige Sedimente, Tissot & Welte 1978, D.) Braunkohle (waf), NL Revier, Böhmsch in Nowel et al. 1994, E.) Darbinjan, zusammengestellt aus Judovic et al. 1985 und Rösler & Lange 1975 in Seim & Tischendorf 1990.

Braunkohle (7): Dem Analysenwert liegt jeweils eine Mischprobe gesamtes Flöz zugrunde; demzufolge sind hohe Werte, wie bekannt z.B. für Schwefel und Titan im obersten Abschnitt des 2. LF „weggemittelt“.

Braunkohlenasche (8): Den Angaben ist die Annahme eines mittleren Aschegehalts zugrundegelegt. Bei Vergleichen von Elementgehalten in der Asche verschiedener Proben ist auf die gemeinsame Bezugsgröße zu achten. Das heißt, die Gehalte in der Asche sind mit dem Ascheanteil der Kohlen auf die Elementgehalte in der Kohle umzurechnen.

Calcium ist *Hauptbestandteil gesteinsbildender Minerale* – primär besonders in Fe- und Al-Silikaten der magmatischen Gesteine, in denen es im Durchschnitt mit 36.200 mg/kg enthalten ist. Durch das Einwirken von Oberflächen- und Grundwässern wird z.B. der instabile Anorthit hydrolytisch gespalten und Ca^{2+} vorübergehend Bestandteil der *Hydrosphäre*. Sowohl aus den Flüssen wie dem Meerwasser wird Calcium von *Organismen* aufgenommen und postmortal angehäuft. Lebensvorgänge in Kombination mit anorganischer Fällung bewirken die Entstehung calciumdominierter Sedimente, diagenetisch verfestigt zu den *Karbonatgesteinen*.

Die infolge von Verwitterung und Umlagerung in den *Tongesteinen* erreichten Calciumgehalte betragen mit 25.300 mg/kg weniger als 1/10 der v.a. durch Organismenbeteiligung entstandenen *Präzipitate*. Die zum Teil monomineralisch aus Calcit bestehenden Karbonatgesteine enthalten durchschnittlich 302.300 mg/kg. In *Sandsteinen* treten Karbonatminerale überwiegend als Porenraumzement auf, selten als klastische Komponente.

Vorkommen im verkippten Abraum - Calciumführende petrographische Komponenten der Abraummischung sind: Karbonat, Kohle, kohlige Substanz, Tonminerale. Die *Tertiärsande* sind karbonatfrei bis -arm. TIC-Gehalte < 0,005 % für das Tertiär-Deckgebirge im Bereich Tagebau Welzow-Süd bestimmt Berger 2000. Nach Rösler & Starke 1986 liegen sie in der gesamten Niederlausitz, abgesehen von höheren Calcitgehalten in *einzelnen* marinen Ablagerungen unter 5 %. Karbonatschalenreste von Organismen sind in den *heute* völlig kalkfreien Sedimenten der Briesker Schichten nicht enthalten, wohl aber *sandschalige Foraminiferen* (als Anzeiger der marinen Ablagerung), Ahrens & Lotsch 1963. Ehemals vorhandener Porenraumzement und Schalenreste aus Karbonat sind möglicherweise durch bereits nach Ablagerung des Flözes huminsaures Grundwasser aufgelöst und weitertransportiert worden. Calciumführender Feldspat (Plagioklas) ist nach dem Ergebnis der qual. XRD nicht enthalten.

Calcium kommt *in den Kohlen, kohligere Substanz* als Karbonat vor. Die unter vergleichsweise sauren Bedingungen gebildeten Kohlen des 2. LF enthalten CaO_d < 3 %, diejenigen des 3. und 4. LF > 3 %, Darbinjan 1989. Zum anderen ist Calcium in der Kohle an Huminsäuren gebunden. Die Anreicherung von *Calcium*, Eisen und Magnesium in der Braunkohle gegenüber der Erdkruste führen Lissner & Schäfner 1956 darauf zurück, daß diese Metalle *unlösliche Humate* bilden. Das derart organisch gebundene Calcium ist als das „fossile Humusgestein“ *Dopplerit* bekannt. Zu Petrographie und Genese siehe Jacob 1958. Doppleritische, sogenannte „vergelte Kohlen“ kommen besonders in dem im Zuge der Flözfreilage mitabgegraben und verkippten obersten Flözabschnitt vor, G. Voigt (LSAB) 3/1998.

Wesentlicher Bestandteil der Glazialen Folge, die den Hauptteil des *Quartären* Deckgebirges einnimmt, ist die Grundmoräne. Der *Geschiebemergel* besteht aus einer Grundmasse von ungeschichtetem Zerreibsel tonig-kalkiger Gesteine, das mit Geschieben bis zu Findlingsgröße durchsetzt ist. Den Karbonatgehalt (Calcit) der Geschiebemergel-

Grundmasse geben Rösler & Starke 1986 für die von ihnen untersuchten Vorkommen einheitlich mit ~ 8 Gew.-% an.

Bis 30 Vol.-% der Geschiebe, Tagebau Seese-Ost sind paläozoische und mesozoische *Kalksteine*, Nowel & Hellwig 1995. Ätzerscheinungen an diesen Kalkgeschieben als Effekt von saurem Grundwasser und/oder Tiefenwirkung von Bodenbildungsvorgängen, weisen auf ihren ursprünglich noch höheren Anteil. Aufgrund der größeren reaktionswirksamen *Oberfläche* der feinkörnigen karbonatischen Bestandteile in der Grundmasse der Geschiebemergel wird diese direkt und stärker zur Pufferung beitragen als die Kalkgeschiebe. Dafür spricht auch, daß man allgemein in entkalkter Grundmoräne vielfach noch Kalkgeschiebe antrifft, Ehlers 1994.

In den tertiären und quartären Deckgebirgssedimenten kann Calcium zudem im *Kationenbelag von Tonmineralen*, die z.B. in der Kohle, kohligen Substanz enthalten sind, auftreten.

Häufigkeit und Verhalten in der Hydrosphäre - Die bei der Verwitterung freiwerdenden Ca^{2+} Ionen werden als Lösungsfracht mit dem Grundwasser und Flußwasser transportiert und erreichen zum Teil das Meer. Der relative Calciumanteil in Flüssen und Binnenseen ist weit höher als im Meerwasser. *Ca^{2+} ist das häufigste Kation in Süßwasser.* Der Calciumgehalt in *Flußwasser* (Lösungsfracht) beträgt, bei großen Schwankungen, durchschnittlich 15 mg/l (=52,8 Äquivalent-% der Kationen), in *Meerwasser* relativ konstant 413 mg/l (=3,4 Äquivalent-% der Kationen), in Füchtbauer 1988. Änderungen erfolgen durch Zustrom, Abstrom von „reinem“ Wasser, d.h. Eisschmelze, Flußspeisung, Evaporation.

Die Calciumgehalte im *Grundwasser* werden wie auch für Oberflächenwässer meist durch das Kalk – Kohlensäure – System (CaCO_3 CO_2 H_2CO_3 HCO_3^- CO_3^{2-}) bestimmt. Durchweg höher als in Oberflächenwässern sind sie bereits aufgrund der um Faktor 10-100 gegenüber der Atmosphäre erhöhten CO_2 -Gehalte der Grundluft und folglich besserer Löslichkeit von Karbonat. In calciumkarbonathaltigen Gesteinen betragen die Calciumgehalte der Grundwässer 60-100 mg/l. Im Kontakt mit gips- oder anhydrithaltigem Gestein wird der Calciumgehalt des Grundwassers vom Gips-Löslichkeitsprodukt bestimmt und beträgt bis 600 mg/l. Als geogenen Normalbereich in Lockersedimenten geben Merkel & Sperling 1996) 35-120 mg/l an.

Pufferreaktionen in der Abraumschüttung - Die *Protonen der Schwefelsäure* als Produkt der „Pyritoxidation“ reagieren mit der Abraumschüttung, insbesondere nach

Aufnahme ins wiederaufgehende Grundwasser. Dabei kann Ca^{2+} durch verschiedene Pufferreaktionen aus Bestandteilen der Abraumschüttung ins Kippengrundwasser mobilisiert werden. Gast & Katzur 1996 verglichen die Zusammensetzung des Grundwassers im Anstrombereich im Vorfeld der Kippen und innerhalb der AFB-Innenkippen der Schlabendorfer und Seeser Felder. Das im Vorfeld von Süden zuströmende Grundwasser entspricht dem HCO_3 -Typ. Über die Grundwasser-Beprobungstiefe (entsprechend der Bedeutung der vertikalen Verteilung der Reaktionskomponenten in der Kippe) machen die Autoren keine Angaben. Nach 400 m Kippenpassage in der relativ jungen AFB-Innenkippe Schlabendorf-S (1975-1991) fanden sie neben Fe^{2+} (aus der Verwitterung des Eisendisulfids) Ca^{2+} als prägendes Kation (Grundwasser des Ca-/Fe- SO_4 -Typs) mit der Absolutkonzentration von 331 mg/l im Vergleich zu 21 mg/l im Anstrom und führten diesen Anstieg in der AFB-Innenkippe auf folgende Vorgänge zurück:

- 1.) die Reaktion des Calcit im Geschiebemergel mit den Protonen der Schwefelsäure,
- 2.) die Protonierung Ca^{2+} besetzter Positionen an organischen Austauschern, i.w. den Huminstoffen der Braunkohle und kohligen Substanz; an Kohle im Vorfeld besteht der Kationenbelag zu 90 % aus Ca^{2+} ,
- 3.) die Protonierung Ca^{2+} besetzter Positionen an anorganischen Austauschern, Tonmineralen, vgl. Pentinghaus 1998 für Tagebau Coschütz und Zwenkau.

Im Kippengrundwasser des vergleichsweise älteren Kippenmassivs Schlabendorf-N (1959-1977) mit bereits wieder erhöhtem pH sind die Gehalte insbesondere von Calcium deutlich zurückgegangen, da Ca^{2+} im Austausch gegen H^+ an Kohle-Austauschpositionen gebunden ist. Möglicherweise in Größenordnungen wirksamer Mechanismus für die kohlereiche Abraumschüttung Meuro. Die organischen Adsorbenten besitzen eine ausgeprägte Ca-Selektivität, Gast & Katzur 1996.

Nach „Pyrit-Verwitterungsversuchen“ von Berger 2000 weisen die Hangendschluffsedimente gleichzeitig hohes Versauerungs- und Puffervermögen auf und es wird Ca^{2+} daraus freigesetzt. Zusammen mit dem in vorliegender Arbeit an Bereichen der Abraummischung mit hohem Hangendschluffanteil bestimmten Ca-Gehalten, weist dies auf Ca^{2+} -belegte Tonmineralflächen der mit Kohle, kohligem Substanz vorkommenden Tone.

Im „Kippengrundwasser“ der Altkippe Berrenrath, Rheinisches Braunkohlenrevier fand Wisotzky 1994 zwischen 294 und 502 mg/l Calcium gegenüber 77 mg/l im Vorfeld.

Biologische Bedeutung - Calcium spielt in der Biosphäre eine wichtige Rolle als *Spurenelement* und als wesentlicher Baustein/Bestandteil von tierischen *Schutz- und Stützgerüsten*, wo es besonders durch marine Organismen gesteinsbildend wird.

Pflanzen: Calcium ist notwendig für das Wachstum aller grünen Pflanzen. *Calcium-Mangelscheinungen* sind die Schädigung besonders des Wurzelwachstums. Im Wege eines Ionenantagonismus bei der Mineralstoffaufnahme wirkt Calcium entgiftend auf den ungünstigen Einfluß von Magnesium. Bei *Calciumüberschuß* wird die Wasseraufnahme und – abgabe gehemmt.

Tiere und Mensch: Calcium ist notwendig für Bau und Bestand des Skeletts. Bei Heranwachsenden kann Calciummangel zum Ausbleiben der Verknöcherung des Skeletts führen. Der *Mangel* von verwertbarem Calcium in der Nahrung führt zur Mobilisierung aus dem Calciumreservoir Knochenapatit sowie zum Sinken des Calciumgehalts im (Blut)serum mit Tetanie als möglicher Folge. Andauernder Calciummangel in der Nahrung ist eine der Ursachen für Osteoporose. Für die *Blutgerinnung* ist Calcium wirksamer als andere 2-wertige Ionen.

Ermittlung des Karbonatgehalts - Die Karbonatgehaltsbestimmung mit einem gasometrischen Verfahren nach Müller & Gastner 1971 ergab für die Abraummischungen Seese-Ost und Meuro nicht ausreichend reproduzierbare Gehalte.

Calcium bestimmt entscheidend das *Puffervermögen* der Abraummischung, s.o. „Pufferreaktionen in der Abraummischung“. Im Ergebnis der Calciumanalysen mittels RFA enthalten die Abraummischungen Seese-Ost und Meuro zwischen 0,03 und 1,25 Gew.-% Calcium. Von den Bestandteilen der Abraummischungen weist *Calcit* den höchsten Calciumgehalt auf. Calciumfreie Karbonatminerale sind nach Untersuchungen an den Flöz-Deckgebirgssedimenten, Rösler & Starke 1978 nicht in den Abraummischungen zu erwarten.

Die mit der RFA bestimmten Calciumwerte wurden für eine Ermittlung der Calcitgehalte genutzt. Entsprechend dem möglichen Vorkommen in den übrigen, ebenfalls puffernd wirksamen Bestandteilen in der Abraummischung bedeuten diese Werte *maximale Calcitgehalte*.

6.4.1 Calciumgehalte – Spülbohrungen

Abraumschüttung Seese-Ost

Das in den Abraummischungen enthaltene Calcium ist überwiegend auf die *Calcit*-führenden Geschiebemergel-Sedimente zurückzuführen, in denen es *in Kombination mit Ton- und Glimmermineralen* auftritt. Die aus diesem petrographisch angelegten Zusammenhang herrührende Korrespondenz zwischen Calciumgehalt und Anteil Fraktion $< 0,063$ mm, Abb. 6-6 A wurde genutzt, um Calciumgehalte der Abraummischungsfolge in den Spülbohrungen anzugeben.

Mitverwendet wurde die Lithologie-Ansprache (Bohrklein bei den Spülbohrungen, Bohrkern bei den Trockenbohrungen) in Beziehung mit den analytisch am Bohrkernmaterial bestimmten Calciumgehalten.

Abraumschüttung Meuro

Im Nordosten des untersuchten Tagebaus Meuro – Teilfeld Großräschen existiert randlich ein Bereich, in dem kein Vorschnittbetrieb stattfand. Hier wurden Geschiebemergel-Sedimente durch die Förderbrücke abgegraben und in die AFB-Innenkippe geschüttet. Durch zwei Bohrungen wird die Schüttungsfolge dieses Kippenbereichs erfaßt. Die Wertepaare (Calcium/Fraktion $< 0,063$ mm) dieser Trockenkernbohrungen MT13 (unterster Abschnitt) und MT15 (gesamter unterer Abschnitt) bilden auf dem Diagramm, Abb. 6-6 (B) einen, von den übrigen Wertepaaren abgrenzbaren Bereich hoher Calciumgehalte relativ zum Feinkornanteil. Dies trifft ebenfalls zu für die durch die Kalkmelioration beeinflussten Proben des Kippentops (0-5 m), Bohrung MT1 und MT10.

Die Wertepaare der übrigen Schüttungsbereiche lassen eine geringe Calciumzunahme mit ansteigendem Feinkorngehalt der Abraummischungen erkennen und bilden die Grundlage für die Zuordnung von Calciumwerten aufgrund des Feinkornanteils in den Spülbohrungen. Nach Lithologie-Ansprache bei den Spülbohrungen ist dort kein Karbonat enthalten und, da ein Vorschnitt vorhandene Geschiebemergel entfernte auch nicht zu erwarten.

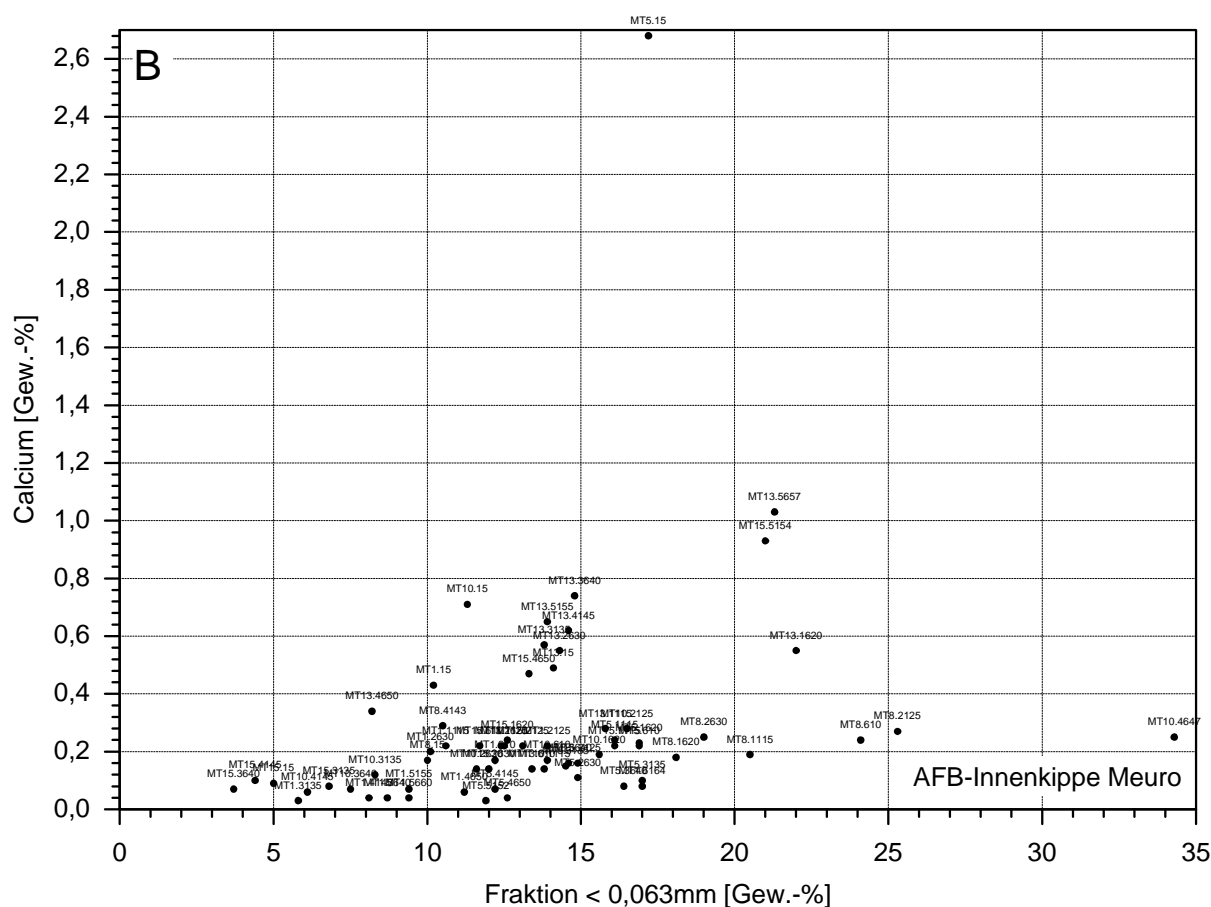
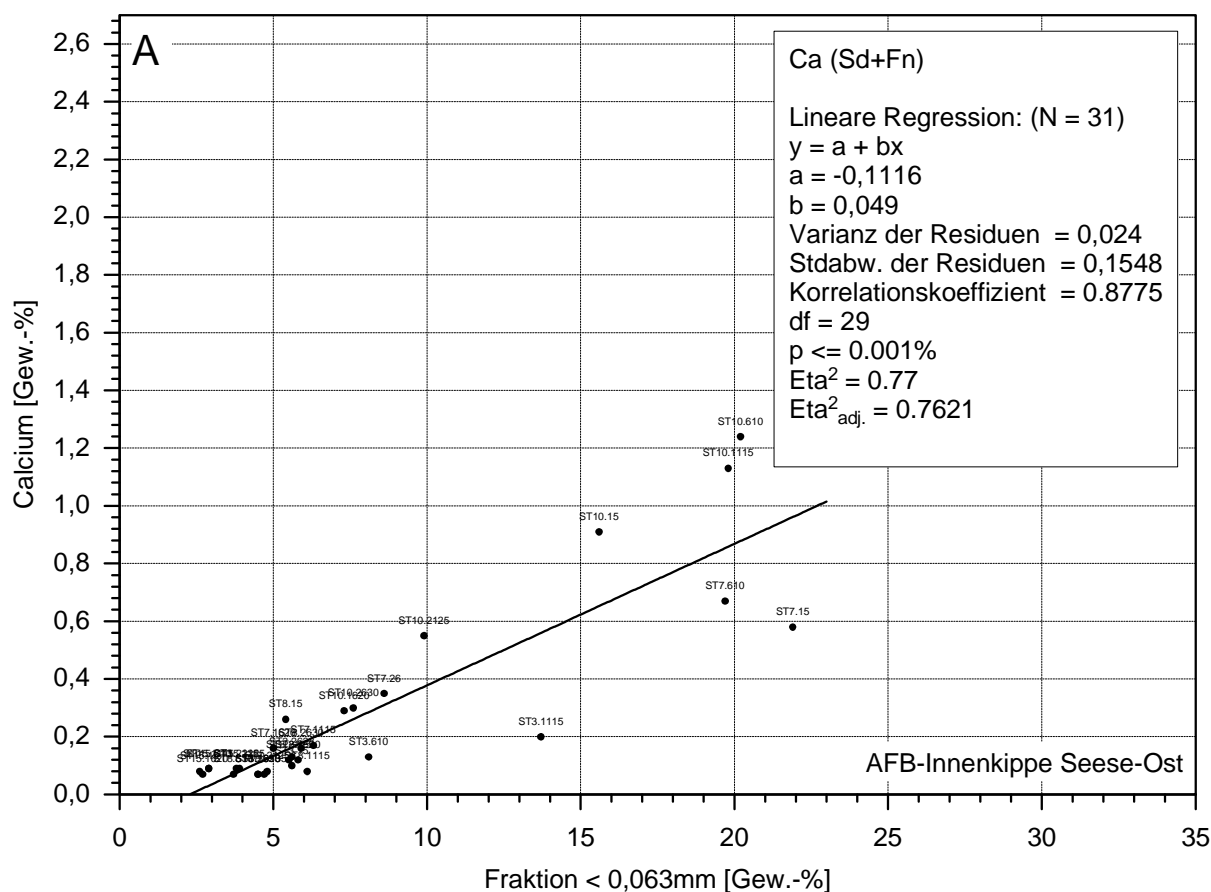


Abbildung 6-6 Gehalte Calcium in Beziehung zum Feinfraktionsanteil, Abraummischung Tagebau Seese-Ost (A) und Meuro (B).

6.4.2 Verteilung von Calcium im Abraummischungskörper Seese-Ost

(Anlagenheft). Die für die Abraumschüttung Seese-Ost bestimmten Calciumgehalte reichen von 0,01 bis 1,24 % (0,025 bis 3,1% CaCO_3).

Für die Profilschnittkonstruktion, Abraumschüttungskörper Seese-Ost und Meuro wird in die Wertebereiche (0-0,1), (0,1-0,25), (0,25-0,75), (0,75-1,25) und, nur in Meuro vertreten (1,25-3) % Ca eingeteilt.

Unterschiedlich ausgeprägt in den Kippenbereichen besteht vertikal eine 2- bis 3-Teilung nach dem Calciumgehalt. Die höheren Gehalte treten jeweils im mittleren und/oder oberen Vertikalabschnitt auf. Mit dem (W – E) Profilschnitt 5 wird tendenziell eine Zunahme der Calciumgehalte *vom Drehpunkt zum Schwenkende* erkennbar. Im Schwenkende, PS (8) – (8) (N – S) folgen auf gering calciumführende Schüttungsmassen des unteren Kippenabschnitts über einem Abschnitt mit mittleren Gehalten Massen mit bis 1,24 % Calcium. Für den letztgenannten Schüttungsbereich, dominiert von Geschiebemergel, lassen sich somit 3,1% CaCO_3 ermitteln. Legt man die von Rösler & Starke 1986 angegebenen 8 % Calcit in der Geschiebemergelgrundmasse zugrunde, beträgt hier der Geschiebemergel-Anteil der Abraummischung nahezu 40 %.

In *Aufschwenkrichtung* nach Süden, Profilschnitt 8 zeigen die Calciumgehalte einen abrupten Abfall. Wahrscheinlich ist dies auf hier verkippten Abraum ausschließlich aus tertiärem karbonatarmem Deckgebirge zurückzuführen.

Der Profilschnitt (4) – (4) (N – S) im mittleren Strossendrittel erreicht diesen durch den Vorschnittbetrieb verursachten Calciumwertabfall nicht (Pleistozän-Deckgebirge, u.a. mit Geschiebemergel wurde andernorts verkippt) und zeigt in der Bohrung SS5 hingegen in größerer Mächtigkeit Gehalte um 1 %.

6.4.3 Verteilung von Calcium im Abraummischungskörper Meuro

(Anlagenheft). Die Calciumgehalte der Abraummischung Meuro liegen mit 0,28 % (0,7 % CaCO_3) (Trockenkernbohrungen) durchschnittlich gleich hoch wie in der Kippe Seese-Ost. Die Werte reichen von 0,03 bis 2,68 % (0,07 bis 6,7), wobei der Maximalgehalt nur als Einzelfall von Gehalten $> 1,25$ % auftritt (Melioration, oberste 5 m Probe). Zusätzlich zur Einteilung der Ca-Gehalte in Seese-Ost wurde für die Profilschnitt-Konstruktion der Wertebereich 1,25-3 % festgelegt.

Meist treten die *höheren Calciumgehalte in den oberen Kippenvertikalabschnitten* auf. Auf 25 ... 35 m mächtiger Abraummischung mit 0 bis 0,2 % Calcium liegen 20 ... 25 m mächtige Massen mit bis 0,75 % Calcium, Profilschnitt 4 und 6. Hier sind die an *kohliger Substanz reichen* Hangendschluffe verkippt. „Sedimente mit höherem Schluffanteil haben das höhere Puffervermögen“, Berger 2000.

Die hohen Calciumwerte der Schüttung im *nördlichen Schwenkende* (MT13, abgeschwächt MT15) werden in keinem anderen Bereich der Innenkippe Meuro erreicht. Abweichend vom übrigen Kippenkörper liegen in diesem Kippenbereich die Maximalwerte im *unteren Abschnitt* und sind auf die hier verkippten Geschiebemergel zurückzuführen.

Für einen großen Teil der untersuchten Kippenfläche sind die Calciumwerte der obersten 5 m durch *Melioration* erhöht. Ausnahme bildet der Bereich im östlichen Schwenkende (MT8) und im nördlichen Schwenkende (MT15).

6.4.4 Mangan

Allgemeine geochemische Charakterisierung – Vorkommen in der Lithosphäre-

Mangan ist nach Eisen das zweithäufigste *Schwermetall* in der Erdkruste, wo es durchschnittlich zu 0,085 % Mn enthalten ist. Mangan kommt in der Natur nie elementar vor, vielmehr gebunden in Mineralen, die in Gesteinen diffus verteilt auftreten oder in Erzlagerstätten angereichert sind. Das Übergangsmetall, im PSE zwischen Chrom und Eisen, zeigt letzterem ähnliches chemisches Verhalten unter Oxidation und Reduktion und tritt in Mineralen in den Oxidationsstufen +2, +3, +4 auf. Wegen der geringen Elektronegativität des Mn^{2+} bevorzugt in ionarer Bindung dieses Ions.

	Granit	Basalt	Sedimentgestein	Sandstein	Tonstein	Kalkstein	Braunkohle	Braunkohlenasche
(0)	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)
Mn	600/-	2.000/-	-	-/250 ^{B.)}	-/670	-/1.100	100 (25-220)	510

Durchschnittliche Mangangehalte [mg/kg] in Gesteinen, jeweils trockene Substanz.

(0)	untersuchtes Element	NG, BG – Nachweisgrenze, Bestimmungsgrenze		
(1)	Granit	Vinogradov 1962 in Rösler & Lange 1975	/	Taylor 1964
(2)	Basalt	Vinogradov 1962 in Rösler & Lange 1975	/	Taylor 1964
(3)	Sedimentgestein	Wedepohl 1969		
(4)	Sandstein	Wedepohl 1969	/	Turekian & Wedepohl 1961 in Mason & Moore 1985
(5)	Tonstein	Wedepohl 1970	/	V. 1962 in R. & L. 1975 (Schiefer und Tone)
(6)	Kalkstein	Wedepohl 1969	/	Turekian & Wedepohl 1961 in Rösler & Lange 1975
(7)	Braunkohle (wf)	Darbinjan et al. 1987		
(8)	Braunkohlenasche	Darbinjan, zusammengestellt aus Judovic et al. 1985 und Rösler & Lange 1975 in Seim & Tischendorf 1990.		

A.) Sand/Sandstein, Pettijohn et al. 1973, B.) Sand/Sandstein, Clarke, n=253 in Wedepohl 1967, C.) Feinkörnige Sedimente, Tissot & Welte 1978, D.) Braunkohle (waf), NL Revier, Böhmsch in Nowel et al. 1994, E.) Darbinjan, zusammengestellt aus Judovic et al. 1985 und Rösler & Lange 1975 in Seim & Tischendorf 1990.

Braunkohle (7): Dem Analysenwert liegt jeweils eine Mischprobe gesamtes Flöz zugrunde; demzufolge sind hohe Werte, wie bekannt z.B. für Schwefel und Titan im obersten Abschnitt des 2. LF „weggemittelt“.

Braunkohlenasche (8): Den Angaben ist die Annahme eines mittleren Aschegehalts zugrundegelegt. Bei Vergleichen von Elementgehalten in der Asche verschiedener Proben ist auf die gemeinsame Bezugsgröße zu achten. Das heißt, die Gehalte in der Asche sind mit dem Ascheanteil der Kohlen auf die Elementgehalte in der Kohle umzurechnen.

Mangan ist in Magmatiten vor allem in *Silikaten* enthalten (lithophil), in denen Mn^{2+} wie das vergleichbar große Fe^{2+} -Ion freie Valenzen der SiO_4 -Tetraeder besetzt, Spessartin $Mn_3Al_2[SiO_4]_3$, Rhodonit $MnSiO_3$ und Braunit $3Mn_2O_3 \cdot MnSiO_3$. Bei der *Verwitterung* magmatischer Gesteine mit *Mangan* und Eisen im Häufigkeitsverhältnis zwischen 1:15 und 1:50 werden diese Metalle mobilisiert und es entstehen unter atmosphärischen, aeroben Bedingungen sekundär Oxide und Hydroxide, Degens 1968. Die schwer wasserlöslichen Manganoxide, die Mn^{2+} (überwiegendes Ion in den Mineralen der Ausgangsgesteine), Mn^{3+} und Mn^{4+} enthalten, werden häufig *belag- und krustenförmig* abgesetzt.

Die Löslichkeitsbedingungen sind für Mn^{2+} und Fe^{2+} ähnlich, d.h. Mangan wird nicht bevorzugt mobilisiert. *Sedimentäre Manganlagerstätten* zeigen jedoch an, daß Vorgänge im exogenen Kreislauf zu einer *Fraktionierung* beider Elemente führen. Ursache ist vor allem die unterschiedliche Reaktion auf pH- und Eh-Änderungen. Bei einem Milieu für die Ausfällung

von *Karbonat* werden beide Metalle gleichzeitig ausfallen, da sich die Löslichkeit der Karbonate kaum voneinander unterscheiden. Vergleiche auch die isomorphen Mischungen von Fe-/Mn-Karbonaten in Ankerit, Breunerit und Mesitin. *Trennend* wirksam wird die erheblich *geringere Löslichkeit der Eisenoxidverbindungen* gegenüber denen des Mangan.

0,096 % Mn in Granit, 0,112 % Mn in ultrabasischem Gestein geben Petrie in Marshall & Fairbridge (ed.) 1999 an. Die Häufigkeit von Mangan in *Sedimentgesteinen* wird durch die Migration des Mangan im terrestrischen Gesteins- und Wasserkreislauf und im marinen Küsten-Sediment-Wasser Kreislauf bestimmt.

Böden enthalten zwischen 20 und 800 mg/kg Mangan. Die Bindungsformen sind schwer lösliche Manganoxide (Mn(II), Mn(IV), Karbonat (als Mangankarbonat sowie Mn²⁺ isomorph für Ca²⁺) und Silikate. In Form löslicher organischer Komplexe ist es direkt pflanzenverfügbar, in sauren Böden mit zusätzlich freigesetztem Mn²⁺. Die Konzentration von Mn²⁺ bestimmt die Pflanzenverfügbarkeit des Mangan.

Vorkommen im Verkippten Abraum (Anlagenband S1.5 und M1.5)

Für Mangan ist in den untersuchten Abraummischungen des Flöz-Deckgebirges das Vorkommen mit *Kohle, kohlig Substanz* und *Geschiebemergel* als Spurenelement in deren organischen und mineralischen Bestandteilen möglich.

Kohle und kohlige Substanz

- in Braunkohlen „größtenteils“ organisch gebunden, Swaine 1990
- als Kationenbelag auf Tonmineraloberflächen
- mit dem in „geringen Mengen“ in Braunkohlen vorkommenden Karbonat, nie > 2%, Swaine 1990

Geschiebemergel

- im Karbonatanteil, Mn²⁺ isomorph für Ca²⁺ im Calcit
- als Kationenbelag auf Tonmineraloberflächen

Das Diagramm Mangan- gegen Calciumgehalt, Abbildung 6-7 zeigt für die Abraummischungen *Seese-Ost und Meuro* vergleichbar

- Wertebereiche und
- im Feld maximaler Calcium- und Mangangehalte Abraummischung aus Schüttungsbereichen mit *Geschiebemergel*; Seese-Ost Bohrungen ST7 und ST10, Meuro Bohrungen MT13 und MT15.

Letzteres weist auf die Bindung des *Mangan an das Karbonat (Calcit)*. Gegen einen Zusammenhang zwischen Mangan- und Kohleführung spricht neben der Verteilung der Wertepaare (C/Mn), Abbildung 6-8 auch, daß in der Abraummischung Seese-Ost, die erheblich ärmer an Kohle, kohlig Substanz ist, Mangangehalte in praktisch gleicher Höhe

wie in Meuro erreicht werden. Mit der „*Kohlekomponente*“ zusammen vorkommende Elemente wie Schwefel treten demgegenüber in Meuro in deutlich höheren Konzentrationen auf.

Häufigkeit in der Hydrosphäre

Oberirdische Gewässer – Mangan ist Bestandteil der meisten Wässer. Infolge der geringen Löslichkeit der Manganminerale in den verwitternden Gesteinen unter pH-neutralen Bedingungen sind jedoch die Konzentrationen sehr gering. *Flußwässer* enthalten durchschnittlich 0,05 mg/l Mn^{2+} . Das wenig mobile Element tritt in Lösung *ausschließlich als Mn^{2+} -Ion* auf und bleibt *unter sauren bis neutralen Bedingungen* gelöst, während es im Basischen leicht oxidiert und als schwerlösliches Oxid ausfällt. Im *Meerwasser* liegen die Konzentrationen in der Regel noch unter denen von Süßwasser. Durch Flüsse eingetragenes Mangan wird in der Tonfraktion des Meeresbodensediments sowie durch Bildung von Manganknollen angereichert und dem Wasser entzogen.

Grundwasser – Mangan ist in den meisten Grundwässern nur in Spuren nachweisbar. Im Grundwasser von *Lockersedimenten* gelten *Gehalte* $< 0,01$ bis $0,3$ mg/l als geogener Normalbereich, Merkel & Sperling 1996.

Verhalten bei pH-Änderung - In Abhängigkeit vom pH und Eh steuern drei geochemische Prozesse die Reaktionen und Teilnahme von Mangan am Exogenen Kreislauf, 1.) Lösung und Fällung durch Oxidation und Reduktion von Mn-Ionen, 2.) Löslichkeitserhöhung von Mn^{2+} durch Komplexbildung mit HCO_3^- im Wasser und durch organische Chelatbildner, 3.) eingeschränkt: Sorption von Mn^{2+} auf negativ geladenen Oberflächen.

Im *sauren Milieu* und/oder Absenken von Eh erfolgt die Freisetzung von Mangan aus Gestein in Lösung und ist Mn^{2+} die beständigste Form. Die Feststellung, daß die Mangankonzentrationen *in Wasser und Boden* weitgehend unabhängig von menschlichen Aktivitäten sind, Merkel & Sperling 1996 muß vor dem Hintergrund der Mobilisierung durch saures Grundwasser als Folge der „Pyritverwitterung“ relativiert werden. So geben Fischer et al. 1998 für den Restlochsee Heide VI bis 14-fach höhere Mn^{2+} -Gehalte an als nach DVGW-Richtwert zulässig. Gast & Katzur 1996 beobachten eine Erhöhung von 0,09 auf 9,8 mg/l im Anstrom bzw. Abstrom der Kippe Schlabendorf.

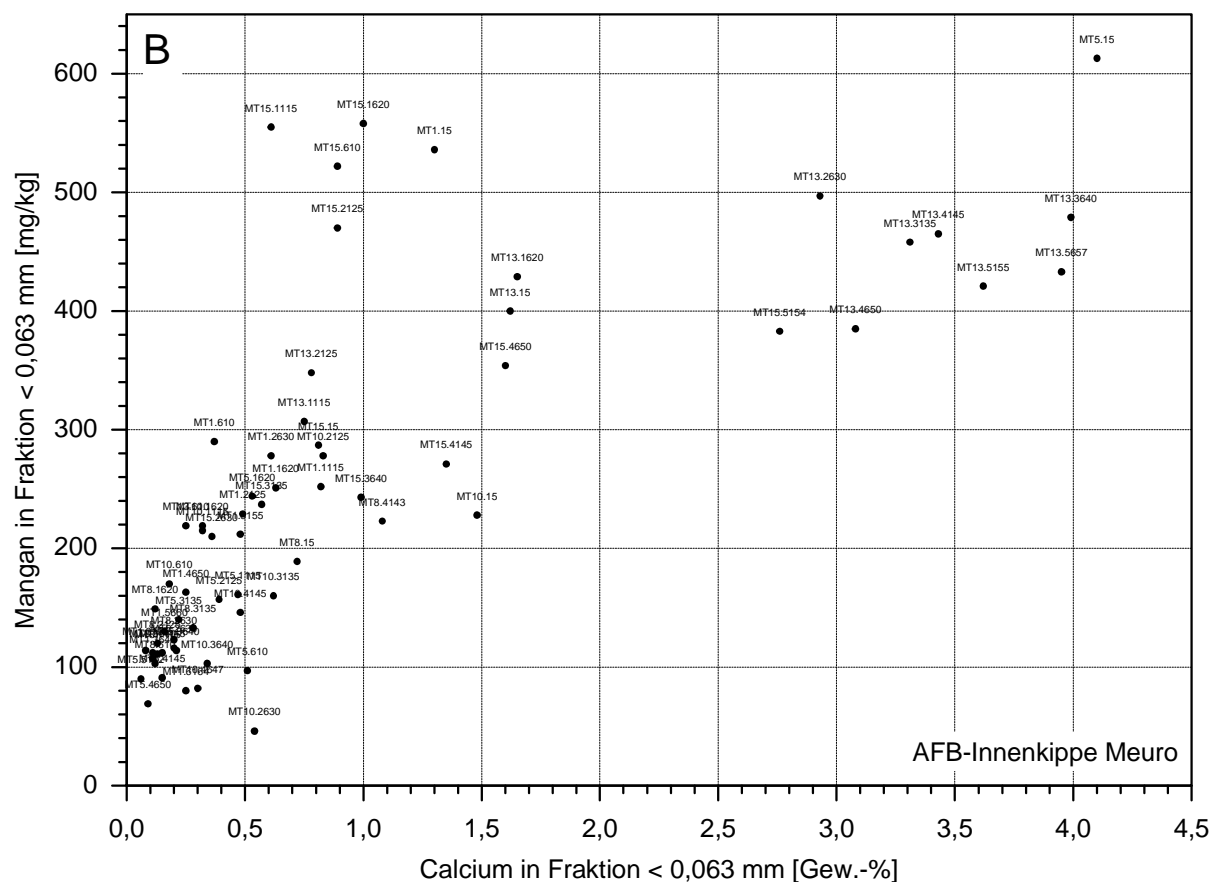
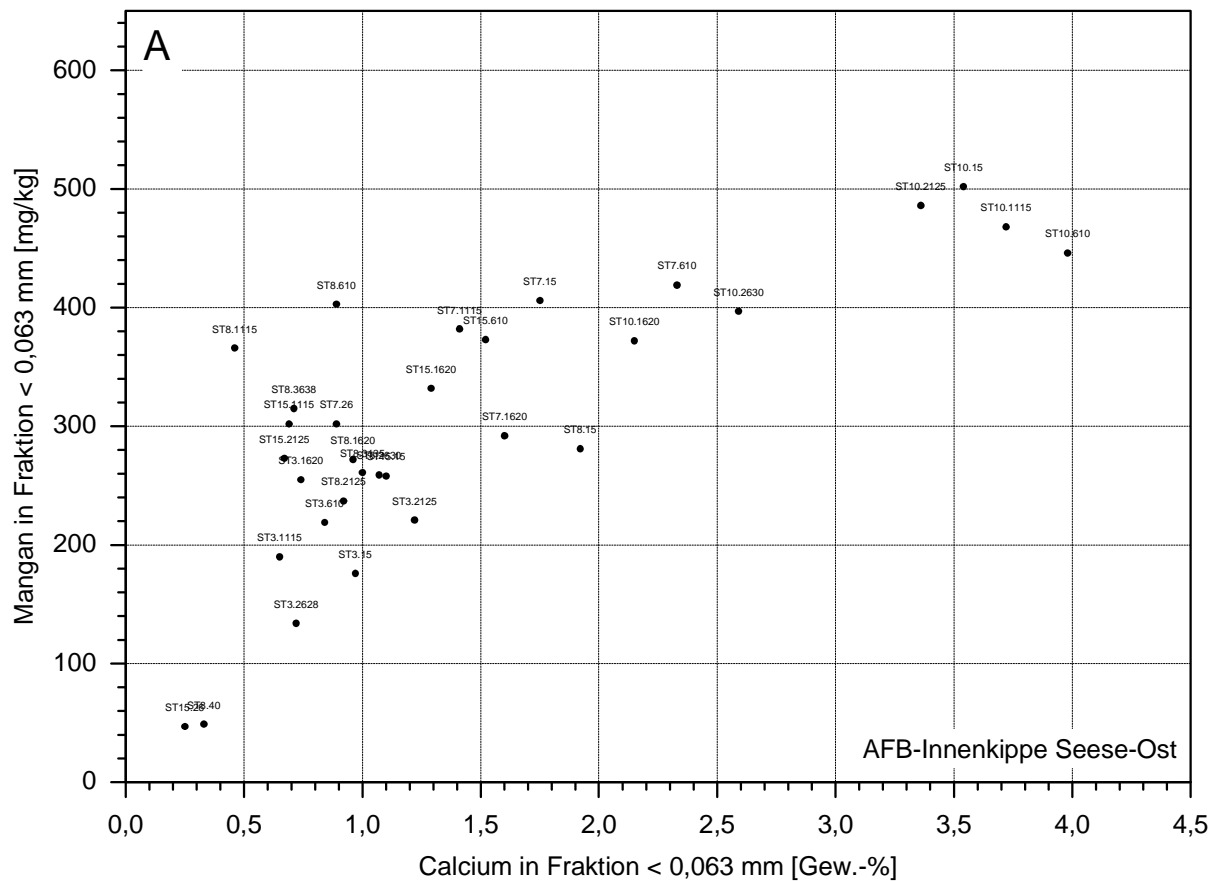


Abbildung 6-7 Gehalte Mangan in Beziehung zum Calciumgehalt, Feinfraktion Abraummischung Tagebau Seese-Ost (A) und Meuro (B).

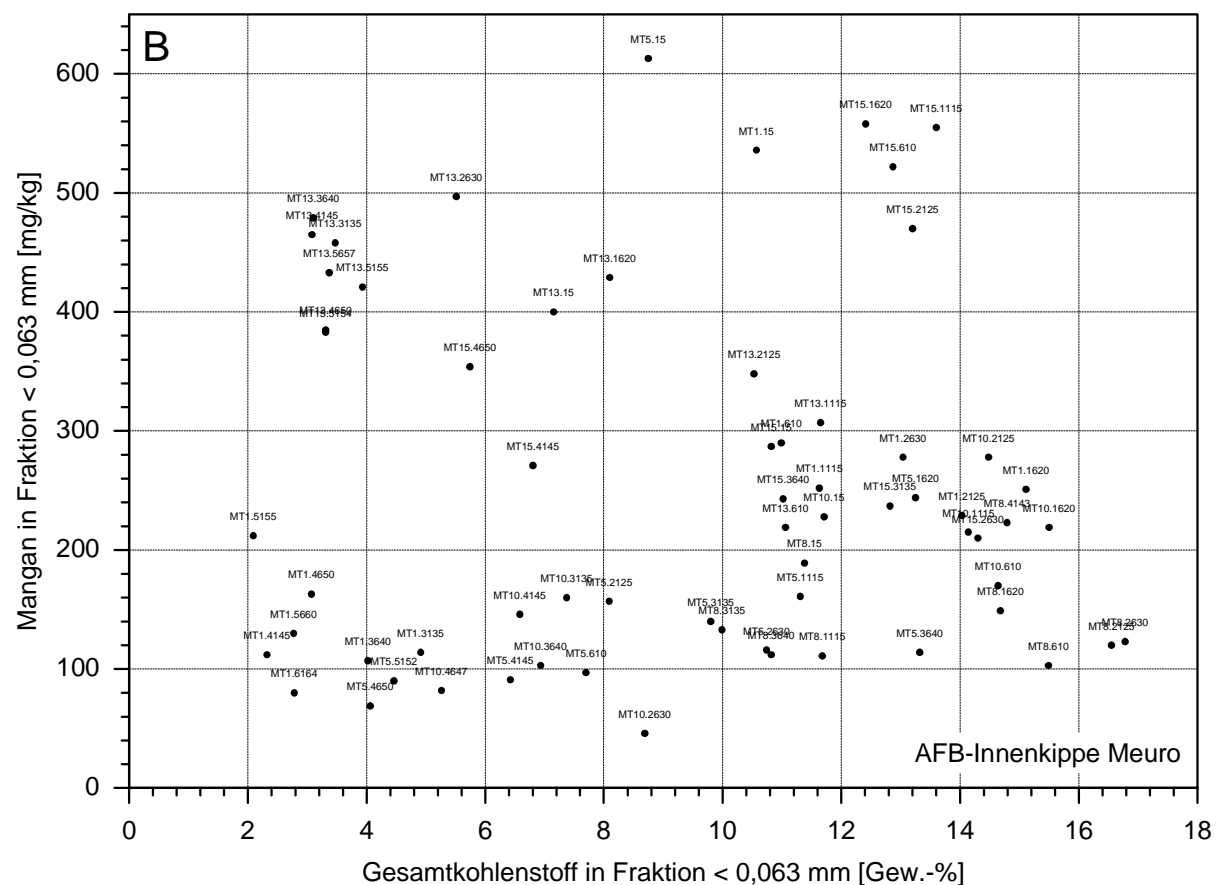
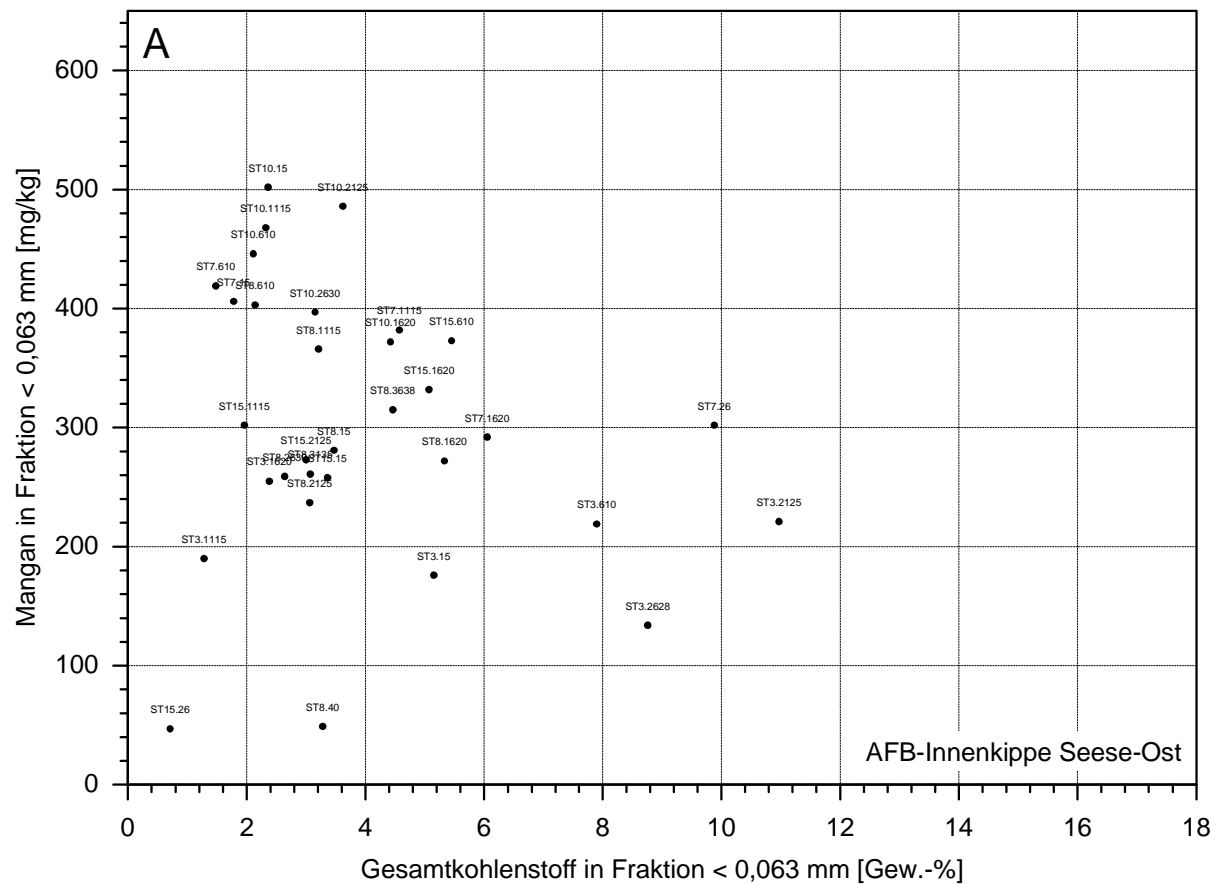


Abbildung 6-8 Gehalte Mangan gegen Gesamtkohlenstoff, Feinfraktion Abraummischung Tagebau Seese-Ost (A) und Meuro (B).

Matthess 1988a weist auf die hohen Konzentration von Mn^{2+} (neben Fe^{2+} und CO_2) von *Grundwässern im Kontakt mit Kaustobiolithen* (wie der Braunkohle) und führt dies auf das durch Sauerstoffzehrung herrschende reduzierende Milieu zurück.

Biologische Bedeutung - Mangan ist „micronutrient“, *essentielles Spurenelement* für alle Lebewesen. Mangan ist in den Protoplasten von Pflanzen enthalten und ist wie Eisen wichtig für die Photosynthese. Im Durchschnitt 400 mg/kg Mn in der Trockenmasse terrestrischer Pflanzen. (-> Kohle!). Unterversorgung führt zu: Wachstumsstörungen, Zyklusstörungen, Dermatitis etc., Merkel & Sperling 1996.

Bei zu hoher Aufnahme dagegen wirkt Mangan *toxisch*. Mn^{2+} , das in der Ionengröße dem Mg^{2+} und Ca^{2+} entspricht und ins Calcitgitter eingebaut werden kann, ist neben Aluminium toxisches Metall im *sauren* Boden.

Vor der Melioration von Böden mit *Flugasche aus der Kohleverstromung*, um Spurenelementdefizite, u.a. an Mangan auszugleichen, ist die pflanzenspezifische Verträglichkeit zu testen, Swaine 1990.

Manganoxidierende Bakterien, die gelöstes Mn^{2+} rasch oxidieren und ausfällen können, wirken wesentlich bei der Manganerz-Lagerstättenbildung mit.

7 „Reaktionskörper AFB-Innenkippe“

Initialer Vorgang für die Milieu- und Beschaffenheitsänderung, vom Braunkohlentagebau beeinflusster Grund- und Oberflächenwässer, ist nach Belüftung und Oxidation der im *Deckgebirge bzw. der Abraummischung enthaltenen Eisensulfide* bei abgesenktem Grundwasser die Entstehung einer *sauren Lösung*. Die Oxidationsreaktion findet im Gesamtgebiet mit abgesenktem Grundwasserspiegel statt. Durch *Stillsetzung* von Tagebauen um 1990 stellen bereits entwässerte *Vorfeldebereiche* dann nicht weiter abgebauter Kohlefeldteile einen Anteil mit belüftetem Kohleflöz und Deckgebirge dar.

Wasserbeschaffenheitswirksam sind v.a. die *Innenkippenmassive* in Kohlefeldausmaß. Darin entsteht beim Grundwassereintritt in den Kippenkörper durch den im offenen Tagebauraum belüfteten sulfidhaltigen Liegendenschluff ein bereits bei Beginn *saures Kippenwasser*. Abhängig von der *Verteilung* versauernder und puffernder Bestandteile der Abraummischung beim weiteren Anstieg verändert sich die Wasserbeschaffenheit bis zum Erreichen des Endwasserspiegels der Kippe.

Problematische Konsequenz der Versauerung ist die verbesserte Löslichkeit von *Schwermetallen* und *Aluminium* im Sediment, die vom Grundwasser aufgenommen und nachfolgend im Trinkwasser Organismen häufig schon in geringen, wenig erhöhten Konzentrationen schädigen. Die sauren Wässer zerstören das natürliche Puffersystem im Abstrom gelegener *Grundwasserleiter* auf Dauer, Pleßow et al. 1997. Erheblich für das Funktionieren der Bergbaufolgelandschaft ist der Einfluß auf die Wasserbeschaffenheit der kippenangrenzenden *Tagebau-Restlochseen* und der angeschlossenen *öffentlichen Vorflut*.

Im folgenden Abschnitt 7.1 steht im Vordergrund, *welche hydrogeochemischen Reaktionen* die Wasserbeschaffenheit beeinflussen und was bei der *Bilanz aus Versauerungs- und Pufferreaktionen* berücksichtigt werden muß.

7.1 Hydrogeochemische Reaktionen in den Abraummischungskörpern - Szenario für den Ablauf der Versauerungs- und Folgereaktionen

Die Schwefelkies-Oxidation und das *Ausmaß der Versauerung* und der Folgereaktionen wird von folgendem bestimmt:

- in der Abraummischung enthaltenen *Sulfidmengen*,
- dem in Wasser – auch Luftfeuchtigkeit - gelösten *Sauerstoff* (Vorhandensein – Verbrauch – Ergänzung), Einwirkung von Vorfeldentwässerung bis zur Wechselwirkung zwischen Kippenwasser und Restlochseewasser
- in der Abraummischung enthaltenen *pufferwirksamen Bestandteilen*, Calcit (als Mineral im Geschiebemergel), Calcit in der Kohle und Ca^{2+} - Kationen an Tonmineralen.

Unabhängig davon, ob für die Ermittlung des *Versauerungspotentials* aus der „Pyritoxidation“ ein Ansatz gewählt wird, bei dem man mit zeitlichen und geometrischen Betrachtungen von *Teilumsätzen* in Vorfeld und Tagebauraum des insgesamt vorhandenen Sulfids ausgeht, z.B. Wisotzky 1994, Rolland et al. 1998a, 1998b und Berger 2000 oder wie in dieser Arbeit von einem *vollständigen Umsatz*, als Ausgangsgröße müssen die in den Abraumschüttungskörpern *enthaltenen Mengen* bekannt sein.

Hydrogeochemische Reaktionen finden im „Reaktionskörper Kippe“ mit unterschiedlicher Intensität *vor, während und langfristig nach* dem Grundwasseranstieg statt.

7.1.1 Ausgangssituation

Vertikales Profil der quarzsanddominierten frischgeschütteten Abraumfolge mit *Kohle, kohligem Substanz, nicht oxidiertem Eisendisulfid, Ton- und Glimmermineralen* und *säurepuffernden Sedimentbestandteilen*.

Verkippte *Reaktionsprodukte* vorangegangener „Pyritoxidation“ durch Belüftung des Deckgebirges mit Beginn der Vorfeldentwässerung und beim Tagebaubetrieb. Dazu Reaktionsprodukte der natürlichen Oxidationsverwitterung in Grundwasserleitern des Flöz-Deckgebirges, z.B. dem Hangendschluff, worauf *vorbergbaulich saure Grundwässer* mit erhöhtem Sulfat- und Eisengehalt hinweisen, Milde 1961, 1966, 1970/71.

Nach sedimentspezifischer Oxidationsrate - mit schnellerem Umsatz in sandigen Sedimenten - sind in der Abraummischung Tagebau Welzow-Süd nach Berger 2000 93 Gew.-

%, in der Abraumschüttung Tagebau Jänschwalde nach Rolland et al. 1998b 96 Gew.-% des Gesamtpyrits im Mittel *noch enthalten*.

7.1.2 Reaktionen in der „Trockenliegezeit“

Die bis über 60 m mächtigen Kippenkörper bleiben nach ihrer Schüttung für einen Zeitraum von mehreren Jahren bis Jahrzehnten und dabei *andauernder Entwässerung* zusammen mit dem angrenzenden Unverritzten innerhalb des GW-Absenkungstrichters unter den Bedingungen der *wasserungesättigten Zone*.

Beim Transport von sauerstoffhaltigem Niederschlagswasser (z.B. 300 mm/a mit 10 mg/l O₂) durch die Sickerstrecke „trockene Kippe“ zum flurfern gehaltenen Grundwasserspiegel tritt das Sickerwasser mit den hier vorkommenden festen *Sedimentbestandteilen*, Adsorptions- und Kapillarwasser und Grundluft in Beziehung und verändert seinen Chemismus. Für die Intensität der Wechselwirkung Sediment – Wasser in der bergfeuchten Kippe ist von Bedeutung: da im *Vergleich zum wassergesättigten Fall* von Grundwasser in einem GW-Leiter nur wenig Lösungsmittel Wasser vorhanden ist, werden die entstehenden Lösungen *hoch konzentriert*, z.B. stark sauer sein. Der aus dem wenigen Wasser schnell verbrauchte gelöste Sauerstoff kann besonders in diesem *oberen porösen Bereich*, vgl. „Gefügeeigenschaften der Abraumschüttungskörper“ konvektiv nachgeliefert werden.

Rolle von gelöstem Sauerstoff - Bei der Bewertung der Oxidation in diesem Tagebaustadium gehen Wisotzky 1994, Rolland et al. 1998a, 1998b und Berger 2000 davon aus, daß der im Porenvolumen „eingeschlossene“ Sauerstoff zum Umsatz einer – geringen - Sulfidmenge ausreicht und anschließend anoxische Verhältnisse in diesem Kippenraum bestehen. Diese Vorstellung wird jedoch dem *nach oben, zum Hangenden des Kippenkörpers hin offenen System* nicht gerecht und es ist problematisch, von einer „anaeroben Sickerzone“ (Rolland et al. 2000) zu sprechen. Kippenteufenabschnitte mit Sulfid und Sauerstoff in der Grundluft sprechen für eine *fortlaufende Oxidationsreaktion*, z.B. Rolland et al. 2000.

Die *Rolle der Porosität* für die Sulfidoxidation im Kippenkörper liegt darin, als *Reaktionsraum und Durchlass* den Nachstrom von Luftfeuchtigkeit (Verbindung zur Atmosphäre mit Luftdruckschwankungen) zu ermöglichen, um den aus der Grundluftfeuchtigkeit verbrauchten Sauerstoff zu regenerieren.

Das bei der Belüftung der sulfidführenden anstehenden Sedimente des Deckgebirges und des Flözes durch *Vorfeldentwässerung* freigesetzte H⁺, Fe²⁺, SO₄²⁻ gelangt teilweise nicht in die Kippe, sondern verläßt den Tagebauraum und wird in der

Grubenwasserreinigungsanlage für die Einleitung in die Vorflut von Säure, Eisen und Sulfat befreit. Die von Reichel & Uhlmann 1995 gefundenen hohen Umsatzraten von Sulfid in diesem Stadium und angenommener pH-erniedrigender *Wirkung auf das Kippenwasser* sind vor diesem Hintergrund zu relativieren.

Oxidation des Eisendisulfids im oberen Kippenteil

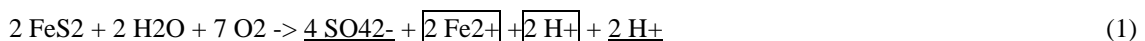
Die Kenntnisse zu diesem Redox-System wurden vorwiegend aus der Untersuchung *oberflächennaher sulfidhaltiger Bereiche*, v.a. Böden entwickelt, zusammengeführt z.B. in Evangelou 1995. Insofern wird die Übertragung auf den obersten Kippenteil mit Zutritt- und Wirkmöglichkeit für Bakterien den tatsächlichen Bedingungen wohl gerecht.

Unter Einwirkung von Luftsauerstoff und dem Sickerwasser (oxidierend wirkt der in Wasser/Luftfeuchtigkeit *gelöste Sauerstoff*) entwickelt sich in den Abraumsedimenten ein System mit schwefel- und eisenoxidierenden Bakterien, von denen *Thiobazillus ferrooxidans* eine besondere Rolle spielen, da sie sowohl Eisen wie Schwefel oxidieren können, Fe(II) -> Fe(III), Sulfid S(-I) -> Sulfat(+VI), Voigt 1990. Die Menge des gelösten Sauerstoffs ist wie die der anderen Luftkomponenten abhängig von der Temperatur.

Sättigungskonzentrationen der Luftkomponenten in Wasser bei Atmosphärendruck, Worch 1997.

Angaben in mg/l	10° C	25° C
O ₂	11,2	8,35
CO ₂	0,808	0,515
N ₂	18,11	14,13

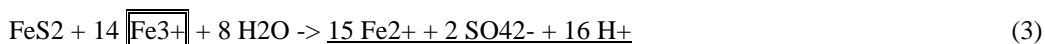
Die Oxidation des Eisensulfids führt über Zwischenschritte zur Bildung von H₂SO₄ (Sulfidacidität) und Freisetzung von Fe(II), die sich in der sauren Sickerwasserlösung abwärts bewegen bzw. Sedimentkomponenten der Abraumschüttung benetzen:



Das entstandene Fe(II) wird nach Gl. 2 mit Sauerstoff zu Fe(III) oxidiert. Diese Reaktion, *gehemmt* unter den herrschenden sauren Bedingungen, wird durch acidophile eisenoxidierende Bakterien (pH < 3 für Bakterien *Thiobazillus ferrooxidans* optimal) um Faktor 10⁶ *beschleunigt*, „bakterielle Oxidation“:



Solange noch FeS₂ vorhanden ist und die Lösung ausreichend sauer reagiert, protolysieren die gebildeten Fe(III)-Ionen sehr langsam und reagieren mit dem Eisensulfid:



100 % des Sulfatsauerstoffs entstammt dem Wasser

Diese Oxidation des Pyrits läuft ca. 10 mal schneller als nach Gl. 1, verbraucht aber schnell das nur im stark sauren gelöst verfügbare Fe(III), ist abhängig von der mikrobiell katalysierten Reaktion nach Gl. 2, welche den bestimmenden Schritt für die Umsetzungsrate des Sulfids darstellt.

In jedem Fall ermöglicht gelöstes Fe³⁺ die Oxidation von FeS₂ auch in Bereichen ohne direkten Zugang von wassergelöstem Sauerstoff.

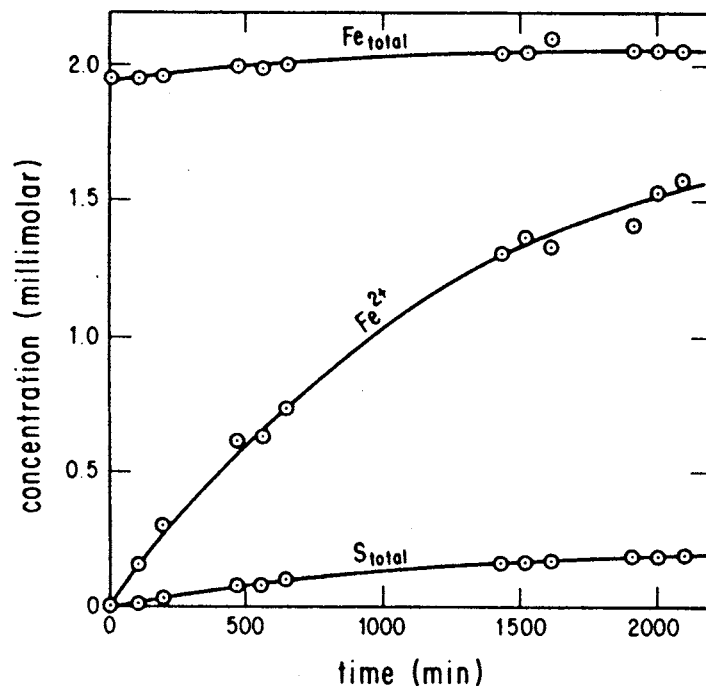


Abbildung 7-1 Oxidation von Pyrit durch Fe(III) im Labor bei pH 1,89 und 30°C, Appelo & Postma 1996.

Das Diagramm der Abbildung 7-1 verdeutlicht, wie wenig bei dieser Reaktion im stark sauren (d.h. Fe(III) gelöst) die Konzentration von Gesamteisen und Gesamtschwefel (i.w. Sulfat) zunehmen, während Fe(II) des Pyrit rasch in Lösung geht.

Die freigesetzten Protonen werden

- per Kationenaustausch zwischengelagert an *Tonmineraloberflächen*,
- echt neutralisiert durch *Karbonat*,
- Bestandteil der *Lösung*.

Fe(OH)₃-Krusten um Sulfidpartikel infolge Karbonatpufferung mit wieder alkalischem Milieu setzen die Sulfid-Oxidationsrate herab, so daß zugegebener Kalk zweifach auf die Pyritoxidation wirkt, Holmström et al. 1999.

Ist alles Sulfid umgesetzt bzw. bei nicht mehr ausreichender Wassernachlieferung (sauerstoffhaltig) in die Tiefe und maximal möglicher Belegung von Austauscherstellen der Tonminerale entlang der Sickerstrecke mit einem Teil der oben erzeugten Protonen und entsprechend angestiegenem pH kommen die Reaktionen nach Gl. 1 bis 3 zum Erliegen. Die *Reaktionsprodukte* der „Pyritoxidation“, $[H]^+$, $[SO_4^{2-}]^-$, Fe(II) und Fe(III) sind Bestandteile des in der Abraummischung vorhandenen Feuchtigkeitsfilms.

7.1.2.1 Bildung einer Eisenanreicherungszone

In der Lösung mit tiefenwärts zunehmendem pH kommt es zunehmend zur Ausfällung des Fe(III) in Form von zunächst amorphem Eisenhydroxid, wiederum unter Freisetzung von Protonen:



Nach der Gleichung, welche die Einzelreaktionen zusammenfaßt, wird sämtliches Eisen bei der „Pyritoxidation“ in Form des Eisenhydroxids ausgefällt und *pro Mol Pyrit werden 4 Mol Säure freigesetzt*:



Das für die Eisenausfällung notwendige Milieu, wieder erhöhter pH, keine weitere „bakterielle Oxidation“ (Gl. 2) und die Pufferung von Teilen der bei den Reaktionen erzeugten Protonen werden *nach einer bestimmten Sickerstrecke* und Wechselwirkung der Lösung mit dem Sediment erreicht. Zum Teil in Analogie zu den Vorgängen bei der Entwicklung des Bodentyps Podsol („Bleicherde“, „Bleichsand“) kommt es zur Bildung einer *Auswaschungszone* (hier: sulfidfreier Bereich) und der Konzentration des Eisens aus der „Pyritoxidation“ in einer *Eisen-anreicherungszone*.

Die *Anreicherung* des Eisens aus der „Pyritoxidation“ findet auch bei der Entstehung des sogenannten *Eisernen Huts* von Sulfiderzlagerstätten statt. Nach Auslaugen des Metallgehaltes in saurer Lösung und Bildung dünner Limonitüberzüge auf Quarz im „oberen Teil der Oxidationszone“, reichert sich Eisen in Form des Oxidhydrats Limonit (Brauneisenerz) innerhalb des „etwas tiefer gelegenen Teils der Oxidationszone“ an, teilweise über relativ kurzlebige Eisensulfate – die hydrolisiert werden – als Zwischenprodukte, Matthes 1996.

Die Befunde von Blowes & Jambor 1990 im Zusammenhang mit der Verwitterung von Sulfiderzlagerstätten machen wahrscheinlich, daß auf der Sickerstrecke mobilisiertes Co und Ni zusammen mit dem Eisenhydroxid aus der Sulfidverwitterung abgeschieden wird.

Schuhmacher et al. 2000 fanden in der *Eisenanreicherungszone* eines periodisch trockenfallenden oberflächennahen Grundwasserleiters des Oderbruchs die Spurenelemente Kupfer und Zink überdurchschnittlich akkumuliert. Die Entstehung der Eisenanreicherungszone in der Kippe beruht ausschließlich auf descendenten Lösungen. Für aufsteigendes schwefelsaures Grundwasser mit im Liegenden aufgenommenen *Spurenelementen* ist das hohe Adsorptionsvermögen des Fe(III)-Hydroxids für den Rückhalt dieser Elemente von Bedeutung.

7.1.2.2 Vertikalzonierung der Kippe vor dem Grundwasserwiederanstieg

- 1.) Nach Oxidation der Sulfide hat sich eine *sulfidfreie Zone* im oberen Teil des Kippenkörpers herausgebildet.
- 2.) Das bei der „Pyritoxidation“ freigesetzte Eisen befindet sich als Hydroxid in einer *Eisenanreicherungszone*.
- 3.) Im darunterliegenden Bereich der Kippe befindet sich *unverwittertes Sulfid* und findet *Oxidation* statt.

ad 1.) Sulfidfreie Zone – Die *Merkmale der Pyritoxidation und Abraummischungszusammensetzung* im oberen Kippenvertikalabschnitt führen meist zu einem erheblichen Anteil Versauerungspotential dieses Bereichs/Stadiums der Pyritoxidation von der Vorfeldbelüftung bis zum Abschluß der Trockenliegezeit:

- die Nähe zur *Atmosphäre*,
- die besonders *lockere Lagerung* und
- *erhöhte Sulfidgehalte* infolge kippentechnologisch bedingt v.a. hier geschütteten *feinkörniger Hangendschluff-Sedimente*.

Dies wird besonders wirksam im Bereich der Innenkippe Tagebau Meuro (Teilfeld Großräschen), wo für die *Oxidation von der Kippenoberfläche* aktuell große Flächen durch die Massenentnahme zur Randschlauchverfüllung, Ortslage Sedlitz entstehen.

Der *Eintrag von Sauerstoff* über Diffusion und konvektiv (Wisotzky 1994 stellte bei Verwitterungsversuchen Unterdruck infolge O₂-Verbrauch fest) sowie durch versickernden Niederschlag (10 mg/l O₂) von der Kippenoberfläche wurde von Kölling 1990, Prein 1993 untersucht und ein teufenabhängiger Umsatz des Sulfids, abhängig von GW-Neubildung (Sickerwassermenge), kf der Sedimente, „Lagerungsdichte“, Pyritgehalt, Pufferkapazität und initialem pH formuliert. Abhängig von diesen Parametern gelangt die „*Oxidationsfront*“ in bestimmter Zeit bis in eine maximale Tiefe. Rolland et al. 2000 kommen mit dem Vergleich

des Modells SAPY (Prein 1993) und gemessenen Sulfid- und O₂-Konzentrationen in der Kippe Gräbendorf zum Ergebnis, daß die Tiefe der Oxidationsfront (sulfidfrei) gut durch das Modell abgebildet, die O₂-Konzentration zur Tiefe dagegen vorschnell auf Null zurückgeht.

Meinert & Storz 2000 interpretieren die Abnahme der elektrischen Leitfähigkeit in den obersten Metern der Kippe Espenhain in der Zeit als Effekt der „allmählichen *Auswaschung der Sulfidoxidationsprodukte*.“ Ein flächenhaftes Vordringen der Sulfidverwitterung in größere Tiefen als die nach wenigen Wochen erreichten *3 bis 5 m* beobachteten sie nicht. Gestützt auf „hochauflösende Temperaturmessungen“ (der exothermen Pyritoxidation) in mehreren Grundwassermeßstellen nehmen sie *räumlich begrenzte Sickerbahnen* für „aufmineralisierte Porenwässer“ in tieferliegende Kippenbereiche (unterhalb der Zone mit vollständig oxidiertem Pyrit) an. Berger 2000 gibt für die Kippe Welzow-Süd die Eindringtiefe der Oxidationszone nach 15 Jahren im Falle von Sediment mit „schluffiger Matrix“ mit 2,5 m, bei „feinsandiger Matrix“ mit 15 m an.

Feldmann & Merkel 2000 führen eine „Eindringtiefe der Verwitterungsfront“ von 3,5 m für einen Bereich der Kippe Cospuden mit 40 Jahren Liegezeit an. Rüde et al. 1998 für die AFB-Innenkippe Zwenkau 2 m. An der Kippe Cospuden ermittelt Hülmeier 2002 nach 1 Jahr Exposition der Kippenoberfläche bis in eine Tiefe zwischen 1 und 2 m FeS₂-Gehalte von 0,6 % gegenüber ursprünglich 3,4 %.

Bearbeiter, die das Versauerungspotential wesentlich auf die Oxidation von der Kippenoberfläche aus zurückführen, müssen die *Tiefenreichweite* der Oxidationszone kennen.

Berger 2000 erstellte dazu auf einer eingeebneten Fläche der AFB-Innenkippe Tagebau Welzow-Süd Geoelektrik-Transsekte quer zur Streichrichtung der „Schüttungsrippen“ mit rollig-bindig Wechselfolge. Das festgestellte Muster der *Widerstandsverteilung* als Momentbild des Verwitterungsvorgangs zeichnet, vergleichbar den Ergebnissen von Lange 1974 für die AFB-Innenkippe Tagebau Seese-West und Buczko 1999 für die Kippe Tagebau Gräbendorf mit regelmäßigem *Wechsel flacher und tiefer Lage* eine Zone mit geringem elektrischen Widerstand die *Struktur der geneigt lagernden Wechselfolgen* nach. Rollig: gut durchlässig, tiefreichend sulfidfrei; bindig: gering durchlässig, nur flach sulfidfrei.

Da der elektrische Widerstand von Tonanteil, Porosität und Wassergehalt und dem Elektrolytgehalt abhängt, sind für *Teufenzuordnungen aus der Geoelektrik* allerdings zusätzlich *Untersuchungen an Bohrproben notwendig*. Dabei ist für den Fall nicht planierter Kippenoberfläche zu beachten, daß in Rinnen Feinkornanteile eine Kolmationskruste bilden,

so daß in diesen Bereichen kaum Sickerwasser eintritt, Scholz & Kaubisch 1986, Hülmeier 2002.

ad 2.) Eisenanreicherungszone - Berger (mdl. Mittlg.) 2000 beobachtet den *Eisenanreicherungshorizont* in Form von Eisenhydroxidkrusten ca. 2 m unter Kippenoberfläche Tagebau Welzow-Süd. Die nicht in zusammenhängender Fläche ausgebildeten Krusten treten v.a. in *tonig-schluffigen* Bereichen auf. Ursache sind möglicherweise die hier erhöhten pH-Werte der Lösung aufgrund der Zwischenlagerung von Protonen an Austauschplätzen von Tonmineralen.

Aufgrund der *Verkrustungen im Porenraum mit Eisenhydroxid* (Teil-Zementation) ist im Bereich des Eisenanreicherungshorizonts mit einer Rückhaltewirkung für noch auf dem Sickerweg befindliche Sulfidoxidaionsprodukte zu rechnen, so daß hier noch für eine bestimmte Zeit erhöhte Sulfatgehalte und pH-Minima festgestellt werden können. Gleichzeitig erschwert dieser Horizont das Fortschreiten der Pyritoxidation, da er schlechter Grundluft und Sickerwasser passieren läßt.

ad 3.) Unverwittertes Sulfid – Oxidation - Im *Porenraum* unterhalb der Eisenanreicherungszone befindet sich *Haftwasser* (näherungsweise 15 %, Lange 1974). Darin gelöst sind, abhängig von den Niederschlagsmengen und der wasserleitenden bzw. -haltenden Eigenschaft der Sedimente, verteilt auf petrographie- und lagerungsgeführten Sickerbahnen Produkte aus vorangegangener „Pyritoxidation“, im wesentlichen eine *schwefelsaure Lösung mit Fe(II)*. Außerdem *Grundluft und Grundluftfeuchtigkeit*.

Im Feststoffanteil der Abraummischung befindet sich *unverwittertes Sulfid*, das entsprechend der Sauerstoffzufuhr über den *nach oben offenen Kippenkörper* oxidiert. Aus *Untersuchungen zur Reaktionskinetik* der Pyritoxidation auch in größeren Kippenteufen existieren eine Reihe von Hinweisen auf in den Abraummischungen stattfindende Sulfidoxidation, ermöglicht durch *anhaltende Sauerstoffzufuhr (O₂-haltige Luftfeuchtigkeit)*.

- Temperaturen von 17 bis 18 °C in 8–20 m Kippentiefe zeigen die *fortwährend ablaufende exotherme Disulfidoxidation an*, Kippe Cospuden, Großwig et al. 1996. Die Reaktion allein durch die geringe, im Porenraum bei der Verkipfung „eingeschlossene Luftmenge“ wäre gering und längst abgeschlossen.
 - Unverwittertes Eisendisulfid und 20 % Sauerstoff in der Grundluftmessung bis in 8 m Tiefe der Kippe Gräbendorf (Rolland et al. 2000) bedeuten *laufende Oxidation, wahrscheinlich auch in größeren Tiefen*, da der O₂-Gehalt unterhalb von 8 m nicht abrupt auf 0 zurückgeht.
-

- Im wasserungesättigten Bereich in 8-30 m unter Kippenoberfläche, AFB-Kippe Espenhain bestimmte Hoth 2000 4,3 +/-2,7 Vol.-% O₂.
- Nach 15 Jahren Trockenliegezeit in der „Oxidationszone“ Kippe Welzow-Süd sind bei noch vorhandenem Sulfid 4 Vol% Sauerstoff in der Grundluft enthalten, Berger 2000.
- Isotopenuntersuchungen an CO₂ in Bodenluft (bis 10 m Tiefe) Kippe Cospuden zeigen neben der Bildung des CO₂ aus der Karbonatpufferreaktion die *Oxidation von Kohle mit Luftsauerstoff*, Nitzsche et al. 2000.

7.1.3 Entwicklung der Kippenwasserbeschaffenheit beim Aufgehen des Grundwassers

Nach jahrelanger Liegezeit der „trockenen Kippe“ unter dem Einwirken von Niederschlags-/Sickerwasser, erfolgt durch Verringerung der Sumpfungswasserentnahme der Grundwasseranstieg in den Abraumschüttungskörper. Die hydrogeochemischen Reaktionen scheinen prinzipiell gleich denen bei der Versickerung von Niederschlag in die Kippen. Doch weisen sie *eigene Merkmale* auf, die hinsichtlich der Wirkung auf die Beschaffenheit des Kippenwassers und der Restlochseen eine Rolle spielen:

- **Verzögerte Verdrängung der Grundluft** führt zu einem initialen Restluftgehalt, der im Kippenwasser gelöst wird.
- **Aufnahme von Reaktionsprodukten ins aufsteigende Wasser** 1.) Das aufgehende Grundwasser nimmt H⁺, Fe²⁺, SO₄²⁻ der durch den Tagebau-Prozeß bereits stattgefundenen Oxidation von Sulfid auf und führt zu einem bei Beginn des Aufstiegs sauren Kippenwasser. 2.) Diese *aufgehende saure Lösung* reagiert mit den Bestandteilen der Abraummischung.
- **Räumliche Merkmale** - Der Kippenwasserspiegel erfaßt die Abraummischung *flächenhaft* über den gesamten Kippenkörper, so daß im Unterschied zu den isolierten vertikalen Sickerbahnen des Niederschlags die *insgesamt enthaltenen Stoffe* beim Kippenwasseraufstieg *reagieren* können.

„Mit ... ansteigendem Grundwasser gelangen die leicht eluierbaren ionaren Bestandteile der *versauerten Bereiche* nach einer Lösung als mobile Phase in Kontakt mit den reaktiven Festphasen (immobile Phase) der *nicht versauerten Bereiche*. Durch diese Wechselwirkung wird die Grundwasserchemie in den Abraumkippen geprägt. Erst in diesem Stadium können die Auswirkungen der Eisendisulfidoxidation auf die Grundwasserqualität beobachtet werden“, Wisotzky 1994.

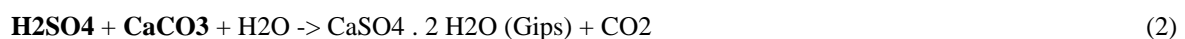
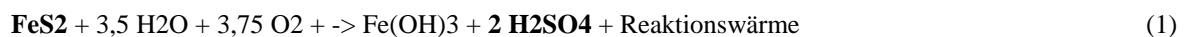
7.1.3.1 Grundwasseranstieg (unterer Teil)

Aufgrund der in der Tagebausohe angelegten *Liegendentwässerungsgräben*, die den wasserstauenden sulfidhaltigen Liegendenschluff durchziehen und darunterbefindlichen GWL mit dem Kippenkörper hydraulisch kurzschliessen, wird das Wasser bevorzugt durch diese linienförmigen Elemente in die Kippe eintreten. Die Versauerungs- und Pufferreaktionen sind von der *Lage der Reaktionskomponenten* im Kippenkörper und wie sie vom aufgehenden Grundwasser nacheinander erreicht werden, abhängig.

Angepaßt an das *Probenintervall* („Auflösungsvermögen“) wird der Prozeß des Grundwasseraufgangs in 5m-Intervallen betrachtet. Die darin enthaltenen Stoffe reagieren in der Lösung und erzeugen in der Abfolge der zum aufgehenden Kippenwasserspiegel parallelen *Scheiben* (bei 1,4 ... 0,7 cm/Tag Anstiegsgeschwindigkeit entsprechend *Zeitscheiben* von 1 ... 2 Jahren Dauer) jeweils eine bestimmte Kippenwasserzusammensetzung.

Es wird davon ausgegangen, daß die hydrogeochemischen *Reaktionen vollständig* ablaufen. Dies wird auch bei der Verminderung der Grundwasserbelastung durch Kalkung des Kippenabraums vorausgesetzt. Die notwendige Reaktion der *homogen* im Abraum verteilten festen Zuschlagstoffe mit der *inhomogen* verteilten Acidität wird durch die vertikale und später horizontale Bewegung des versauerten und Fe²⁺-reichen Sicker- bzw. Grundwassers in der Abraumkippe sichergestellt, Obermann & Wisotzky 1998.

Die *Beschaffenheit* des im Kippenkörper aufgehenden Grundwassers wird in vorliegender Arbeit anhand der *scheibenweisen Bilanz* aus 1.) der säurebildenden „Sulfidoxidation“ in wässriger Lösung und 2.) der Pufferung der schwefelsauren Lösung durch Calcit gekennzeichnet.



So enthält beispielsweise eine Abraummischung („Scheibe“) mit 1,2 Gew.-% FeS₂ und 0,3 Gew.-% CaCO₃ nach vollständig abgelaufener Reaktion (1) 1,96 Gew.-% H₂SO₄, die sich durch Pufferung (2) auf 1,666 Gew.-% ermäßigt. Bei der Berechnung werden die für die Bilanz interessierenden Reaktionspartner (fettgedruckt) entsprechend ihrem Molekulargewicht in stöchiometrischer Reaktion zueinander in Beziehung gesetzt.

Gleichung (1): 1,2 (Anteil FeS₂) / 120,1 (Molekulargewicht FeS₂) = x (gesuchter Anteil H₂SO₄) / 196 (Molekulargewicht 2 H₂SO₄).

Gleichung (2): $0,3 \text{ (Anteil CaCO}_3\text{)} / 100 \text{ (Molekulargewicht Calcit)} = y \text{ (gesuchter Anteil gepufferte H}_2\text{SO}_4\text{)} / 98 \text{ (Molekulargewicht 1 H}_2\text{SO}_4\text{)}.$

Das Puffervermögen wird vom *Calciumgehalt* abgeleitet, (Abschnitt 6.4). Damit ist Calcit und Ca^{2+} als wichtiges austauschbares Kation (Austauschpufferung) berücksichtigt. Berger 2000 findet bei den als „nahezu“ karbonatfrei analysierten Proben (Böschung Gewinnungsseite Tagebau Welzow-Süd, erwärmte Phosphorsäure, Karbonatgehalt über Messung CO_2 -Gasvolumen) das höchste Puffervermögen für den Hangendschluff und stellte bei Eluierungsversuchen für diese Sedimente erheblichen Calcium-Austrag fest.

Mischungsmodell - Für die *Veränderung der Kippenwasserbeschaffenheit* beim „scheibenweisen“ Aufstieg durch den Kippenkörper, Abschnitte 7.3 und 7.4 wird davon ausgegangen, daß sich die in einer Scheibe aus der Bilanz ergebende Zusammensetzung (Rest H_2SO_4 , Gew.-%) mit der in der folgenden Scheibe anteilig (je zur Hälfte) mischt.

Scheibe	Säureanteile	Basenanteile	<ul style="list-style-type: none"> • Anzahl resultierende Basen- bzw. Säureanteile im Kippenwasser, Übergang nächste Scheibe • Mischungsrechnung
...
3	1 S	2 B	B $(B + B)/2$
2	17 S	27 B	B $(8 S + 10 B)/2$
1	10 S	2 B	8 S

Die Reaktion wird hier vereinfacht mit „1 Basenanteil neutralisiert 1 Säureanteil“ dargestellt. Dem Szenario der Kippenwasserentwicklung Seese-Ost und Meuro liegt der aus der Bilanz von Gl. (1) und Gl. (2) resultierende Anteil H_2SO_4 zugrunde. Über den Zusammenhang zwischen der Konzentrationsangabe in % H_2SO_4 und $\text{mol H}_2\text{SO}_4/\text{l}$, Tabelle „Dichte von Schwefelsäure“ in Rauscher et al. 1986 sowie den konzentrationsabhängigen *Aktivitätskoeffizienten*, Tab. 11.1.2 wurden *pH-Werte* errechnet. Für den Fall, daß die potentiell entstehende Säure vollständig gepuffert wird, werden die restlichen Karbonatanteile angegeben.

Die Veränderung der Kippenwasserzusammensetzung nach dem Mischungsmodell findet bis zum Erreichen des *maximalen Kippenwasserspiegels* (=Restlochseespiegel) statt. Für den darüberliegenden Bereich ausschließlicher *Sickerwasserbeeinflussung* wird *scheibenweise* – ohne Pufferreaktion und Mischung aufeinanderfolgender Scheiben – die aufgrund der enthaltenen Disulfidkonzentration entstehende H_2SO_4 [Gew.-%] bzw. pH angegeben. Außerdem das enthaltene CaCO_3 .

Die *Pufferreaktion* wird aufgrund der nur in einzelnen Bahnen sickenden Niederschlagswässer wahrscheinlich nur *unvollständig* wirksam, vgl. Schöpke et al. 2000.

Rolle von gelöstem Sauerstoff - Beim Aufstieg des Grundwassers in den mit Grundluft und Haftwasser gefüllten Porenraum wird die *Oxidation von Sulfid* gegenüber vorher geringen Umsatzraten im *jetzt weitgehend wassergesättigten Zustand* vollständig eingeleitet.

Wie schon während der „*Trockenliegezeit*“ der Kippe wird verbrauchter Sauerstoff bei *Sulfidoxidation beim Aufgehen des Grundwassers* durch den Vorrat aus dem Hangenden kontinuierlich ergänzt. Dazu kommt, daß die vom Wasser verdrängte Grundluft nur so lange aufwärts *entweichen* kann, wie sie zusammenhängend im Porenraum verteilt ist. *Initiale Restluftgehalte* verringern sich durch *Kompression* im Porenraum und *Lösung* in Porenwasser, Luckner et al. 1998 (Flutungsexperiment zur Sanierung Uranerzgrube Königstein).

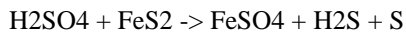
Es ist wahrscheinlich, daß die *Sulfidoxidation beim Sättigungsvorgang* durch das aufgehende Grundwasser durch die fortschreitend aufgenommenen Reaktionsprodukte vorausgegangener Pyritoxidation in der „Bergfeuchte“ verstärkt wird. In dem von Beginn des GW-Aufstiegs an *sauren Milieu* werden Bedingungen für die Wirksamkeit auch des Fe^{3+} als Oxidationsmittel bestehen.

Mit der Untersuchung der bisherigen Wasserbeschaffenheitsentwicklung des Restlochsees Heide IV für die Prognose der weiteren Entwicklung kommen Fischer et al. 1998 zu dem Ergebnis, daß die nach Verkippung bei der Sulfidoxidation durch den *Niederschlag* (mit 10 mg/l O_2) freigesetzten Sulfat-, Protonen- und Eisenmengen bei weitem nicht ausreichen, um die im Seewasser enthaltenen Konzentrationen zu erklären. Es ist davon auszugehen, daß größere Anteile der Oxidation des Sulfids bereits beim Tagebauprozeß und vor allem *beim Grundwasseraufgang* in den Kippenkörper erfolgte und die Wasserbeschaffenheit des Restlochsees entscheidend beeinflußt hat.

Die von Schöpke et al. 2000 gefundene *vertikale Gliederung der Kippenwasserbeschaffenheit* in der AFB-Innenkippe Schlabendorf-Nord und der beobachtete „*Durchzug von Säurewolken*“ in bestimmten Tiefenstockwerken durch den Kippenkörper entlang des hydraulischen Gradienten zum Restlochsee hin deuten auf in bestimmten Kippenteufen konzentrierte versauerungswirksame Komponenten. Die „Pyritoxidation“ dauert 20 Jahre nach der Verkippung noch an.

7.1.3.2 Reaktionen im anaeroben Milieu

Überführung des Pyrits in reaktionsfähigere Form - Für Monosulfide ist die *Löslichkeit in Säuren* unter Entwicklung von Schwefelwasserstoff bekannt, Hollemann-Wiberg 1995. Im Zusammenhang mit der Verwitterung sulfidischer Erzlagerstätten wird in Gmelin 1969 das *Einwirken von Schwefelsäure bei Sauerstoffmangel* (Zementationszone) auf Pyrit beschrieben. Danach wird auch das *Disulfid* umgesetzt.



Es erfolgt die Oxidation eines Schwefels des Pyrits. Unter anhaltend sauerstoffarmen Bedingungen an den Reaktionsbereichen mit H_2SO_4 und unverwittertem Pyrit ist anzunehmen, daß das H_2S nicht oxidiert. Wahrscheinlicher ist unter den nach der Reaktion pH-erhöhten Bedingungen auf dem Wege einer Rückreaktion die Entstehung von *Eisenmonosulfid*. Dieser reagiert mit dem *elementaren Schwefel* als Oxidationsmittel für den Schwefel zu FeS_2 · *Gel, Melnikowit*, der auch bei der Neubildung von Pyrit, etwa der Sulfatreduktion durch anaerobe Bakterien, über das Zwischenprodukt H_2S entsteht. Das Eisen bei der Rückreaktion entstammt dem säuregelösten Pyrit.

Für *Melnikowit-Pyrit* gilt nach Ramdohr 1975, S. 580 eine „sehr viel höhere Empfindlichkeit“ gegen Verwitterung und höhere Löslichkeit als für Pyrit. Die Löslichkeit des Zwischenprodukts FeS in Säuren wurde oben angeführt. Konsequenz der Einwirkung von schwefelsaurer Lösung auf unverwitterten Pyrit ist die *Entstehung von reaktionsfähigerem Sulfid*.

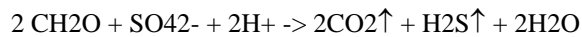
Organische Substanz – reduktive Prozesse

In den Kippenkörpern ist fein verteilt organische Substanz in Form von *Kohle bzw. kohligere Substanz* enthalten. Durch die *Verteilungscharakteristik* ist es für mögliche Wechselwirkungen mit schwefelsaurer Lösung gut erreichbar. Berger 2000 beobachtete bei Pyritoxidationsversuchen *mit zunehmendem Säuregehalt eine Zunahme von gelöstem organischen Kohlenstoff (DOC)*. Damit besteht die Möglichkeit, daß z.B. sulfatreduzierende *Bakterien* bei entsprechendem Milieu (strikt anaerob) das in den Kippen enthaltene organische Material nutzen können, Rumpel 1999.

Sulfid und Kohle bzw. kohlige Substanz treten in der Abraummischung meist kombiniert auf, z.B. in den verkippten Hangendschluffsedimenten, so daß mit vorhandener bzw. langfristig sich formierender *schwefelsaurer Lösung und DOC* unter Umständen (verhinderter

Sauerstoff-Zutritt) die Voraussetzungen für *mikrobakterielle Sulfatreduktion* gegeben sein können.

Die *Desulfurikanten* (*Desulfovibrio*) nutzen Sulfat-Sauerstoff zur „Veratmung“ von Kohlehydraten. Sulfatsauerstoff ist Wasserstoff-Akzeptor bei der *Dehydrierung organischer Substanz*, die als Wasserstoff-Donator wirkt, Leuchs 1988.



H₂S ist Basis der Sulfidbildung. Z.B. Hoth 2000 sieht in der Sulfidfällung die Möglichkeit zur Schadstoffimmobilisierung. Sulfatreduzierende Bakterien werden nur unter *strikt anaeroben und reduzierenden Verhältnissen wirksam*. Sauerstoffarmut reicht nicht aus.

Unter zu untersuchenden Umständen sind in begrenzten Bereichen in den AFB-Innenkippen - *Mikromilieus* - die Bedingungen für die bakterielle Sulfatreduktion in gering durchlässigen Bereichen geben. So deutet, Leuchs 1988 zufolge das Auftreten dieser Bakterien in sauerstoffhaltigem Grundwasser auf anaerobe Sulfatreduktionslinsen hin, die lokal gebunden an *Holz- und Torfeinlagerungen* auftreten.

Das aus reduktiven Vorgängen und Pufferung mit Karbonat resultierende *Kohlendioxid* verläßt das damit übersättigte Kippenwasser, z.T. über die Sickerzone auf diffusivem Weg, Obermann & Wisotzky 1998. Teilweise wird es möglicherweise zusammen mit anderen Bestandteilen der Grundluft an Kohle bzw. kohlige Substanz *adsorbiert*, Lissner & Schäfer 1956.

7.1.3.3 Grundwasseranstieg (oberer Teil)

Die unter Sickerwassereinwirkung entstandenen *Eisenhydroxidabscheidungen* unterhalb der sulfidfreien Zone gelangen unter Grundwassereinfluss. Für die Überführung der schwerlöslichen Fe(III)-Verbindungen in *lösliche, transportfähige Fe(II)-Verbindungen* ist die Beteiligung eisenreduzierender Bakterien zwingend, Voigt 1990. Beim Abbau organischer Substanz und nach vollständiger Zehrung des *gelösten Sauerstoffs* nutzen diese die Fe(III)-Verbindungen als Elektronenakzeptoren.



Für die Herkunft der *mikrobiell verwertbaren organischen Substanz* ist neben der Infiltration über die *nahe Kippenoberfläche* ein mit dem Grundwasser zugeführter Teil aus der Reaktion der schwefelsauren Lösung mit der feinverteilten Kohle möglich, Berger 2000. Die rein anorganische Reaktion der aufsteigenden sauren Lösung mit dem Eisenhydroxid (als

reversibler Puffer, d.h. Alkalinitätsgewinn bei Lösung geht durch Fällung wieder verloren) lautet:



In jedem Fall werden die Fe(III)-Verbindungen als *Eisenhydroxidpuffer* zum Verbrauch von Protonen und entsprechend pH-Anhebung des nunmehr kippenoberflächennahen Wassers führen. Abschließend Übertritt des eisensulfatreichen Wassers in die *sulfidfreie Zone*.

7.2 Die AFB-Innenkippen Tagebau Seese-Ost und Tagebau Meuro im Rahmen der Regionalen Hydrogeologie der Niederlausitz

Vorbergbauliche hydrogeologische – hydrologische *Randbedingungen* sind zum Teil auch *postmontan wirksam* und ihre Kenntnis eine Grundlage für die Prognose des nachbergbaulichen Zustands:

- Pleistozäne Auswaschungsrinnen (häufig kohlenfeldbegrenzend),
- Grundwasserstand,
- Grundwasserstromrichtung.

Nach einem Überblick zur Regionalen Hydrogeologie der Niederlausitz wird daher in den tagebauspezifischen Abschnitten die vorbergbauliche Hydrogeologie behandelt.

7.2.1 Regionale Hydrogeologie der Niederlausitz

Die genetisch-geomorphologische Gliederung der Niederlausitz in Hochflächen/Becken und Urstromtalgebiete gibt im wesentlichen die *regionalen hydrogeologischen Einheiten* vor, Jordan & Weder 1995. Von Norden nach Süden sind dies:

- *Hochflächen* nördlich des Baruther Urstromtals (*Jungmoränengebiet*, Sander) - nördliches Grundwassereinzugsgebiet des Baruther Urstromtals,
 - Baruther *Urstromtal* – Grundwasserentlastungsgebiet
 - *Glazialhochflächen* mit eingesenkten pleistozänen *Becken* im nördlichen Hinterland des Endmoränenwalls „Niederlausitzer Grenzwall“ – südliches Grundwassereinzugsgebiet des Baruther Urstromtals; randlich zum Urstromtal liegt die untersuchte *AFB-Innenkippe Tagebau Seese-Ost*
 - *Altmoränen- und Beckengebiet* südlich des Lausitzer Grenzwalls - nördliches Grundwassereinzugsgebiet des Lausitzer Urstromtals, randlich zum Urstromtal liegt die untersuchte *AFB-Innenkippe Tagebau Meuro*
-

- Lausitzer *Urstromtal* - Elbetal

Die AFB-Innenkippe Tagebau *Seese-Ost* liegt am Nordabhang der von *saaleglazialen Ablagerungen* dominierten Hochfläche am Übergang zum Baruther Urstromtal mit holozäner Sedimentbedeckung und der ESE → WNW fließenden Spree als Hauptvorfluter. Die AFB-Innenkippe Tagebau *Meuro* liegt im Bereich der *Raunoer Tertiärhochfläche*, teilweise mit Altmoränenbedeckung sowie pleistozänen Becken direkt am Rand zum Westteil des Lausitzer Urstromtals und der Schwarzen Elster als Hauptvorfluter.

Die Grundwasserleiter (GWL) im Niederlausitzer Braunkohlenrevier - Wie im gesamten Brandenburg können die Lockergesteine des durchschnittlich 100-200 m mächtigen *süßwasserführenden Grundwasser-Stockwerks* im Niederlausitzer Braunkohlerevier in drei aus Sanden und Kiessanden bestehende GWL mit zwischengelagerten GW-hemmenden bzw. -stauenden Geschiebemergeln und tonigen Schluffen gegliedert werden, Stackebrandt et al. 1997. Vom Hangenden zum Liegenden:

GWL1

weitgehend *unbedeckt*

zum Teil lagern Auelehme und anmoorige Bildungen auf

als GWL1 1 in *Urstromtälern* und Niederungen, 10 ... 20 m, vorwiegend aus weichsel- und spätsaalezeitlichen (S II) *Sanden und Kiessanden*

als GWL1 2 nur zum Teil auch in weichsel- und saaleglazialen Sanden höherer Gebiete (*Hochflächen*), vorwiegend Sander

saalekaltzeitliche Geschiebemergel, im südöstlichen Brandenburg erodiert, deshalb GWL2 zum Teil unmittelbar unter GWL1, infolgedessen über 40 m nutzbare GWL-Mächtigkeit, bestimmen maßgeblich das Rückhaltevermögen der Grundwasserüberdeckung

GWL2

weitgehend von Geschiebemergel der Saale-Grundmoräne *bedeckt*

bestehend aus *Sanden und Kiessanden*

wesentlicher nutzbarer GWL mit „nicht selten“ über 40 m der Hochflächen Tagebaue Seese-Ost und Meuro von elsterzeitlichen Grundmoränen unterlagert

bisweilen reichen Erosions- und Exarationsreste tertiärer Sande in dieses Niveau (GWL2 zugeordnet)

hauptsächlich wasserwirtschaftlich genutzter GWL in Brandenburg

elsterkaltzeitliche Geschiebemergel und tertiäre Schluffe

GWL3

überwiegend *tertiäre Sande* oberhalb Rupelton sowie die in diese Sande eingreifenden Sande und Kiessande in tief eingeschnittenen quartären Rinnen

zum Teil von elsterkaltzeitlichem Geschiebemergel, zum Teil von tertiären Schluffen überdeckt

durch Schluff-Braunkohle-Schichten untergliedert

GWL1 und GWL2 sind im Niederlausitzer Braunkohlenrevier vielfach durch ihre Lage in *bergbaubedingten Absenkungstrichtern* charakterisiert mit folglich nicht natürlichen Grundwassergefälleverhältnissen und Grundwasserströmung allseitig auf die Tagebaue zu.

Abbildung 7-2 zeigt die Ausdehnung des zusammenhängenden Grundwasserabsenkungstrichters des Niederlausitzer Braunkohlenreviers im Jahr 1993 und die voraussichtliche Entwicklung zu drei isolierten Trichtern „Nord“, „Mitte“ und „Süd“ mit den weiterhin betriebenen Tagebauen Jänschwalde/Cottbus Nord, Welzow-Süd und Nochten im Jahr 2020.

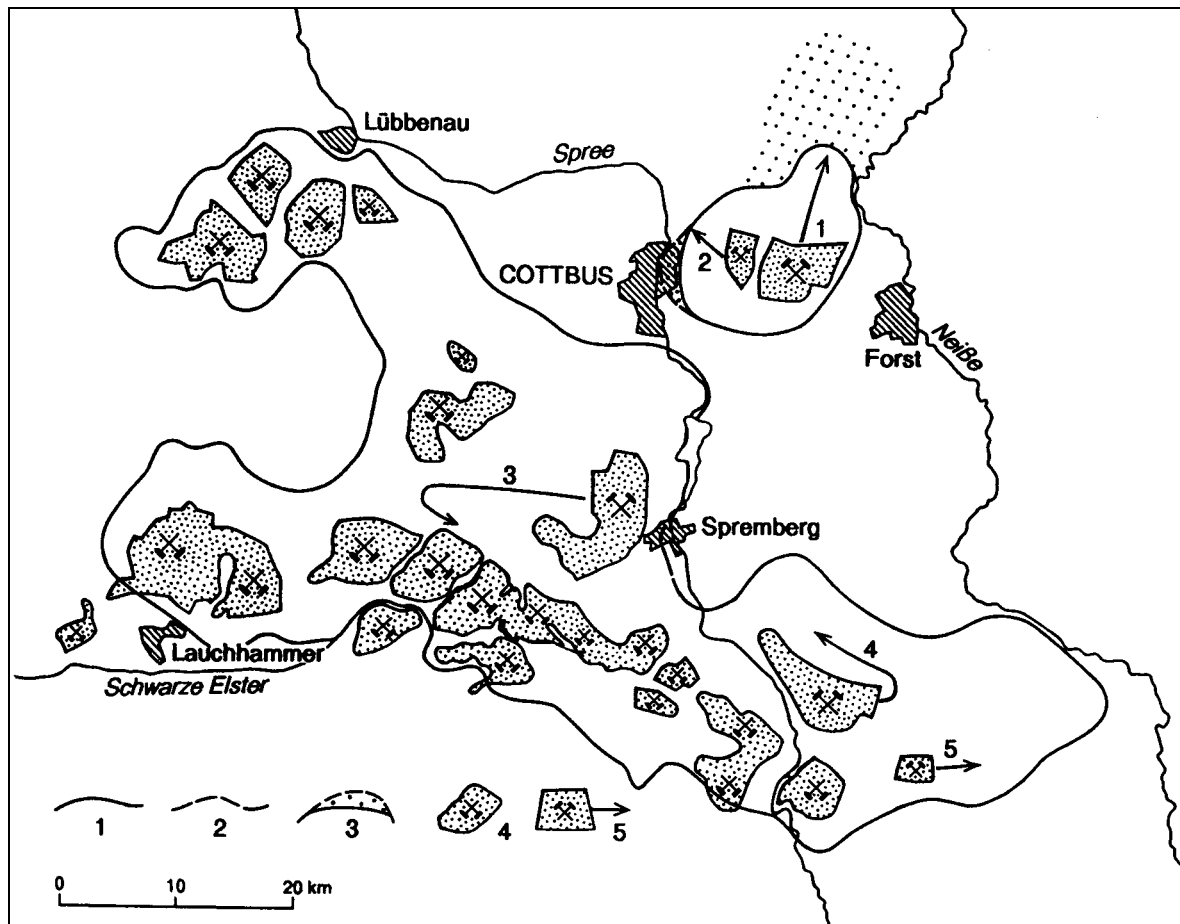


Abbildung 7-2 Entwicklung der Grundwasserabsenkungstrichter Niederlausitzer Braunkohlenrevier 1993 ... 2020; 1–Stand 1993; 2–Stand 2020; 3–Flächen mit weiterer Inanspruchnahme statischer Grundwasservorräte bis 2020; 4–stillgelegte bzw. Ausläufertagebaue, 5–Langläufertagebaue mit Abbaurichtung, verändert nach Eckhardt 1995.

Das Niederlausitzer Braunkohlenrevier liegt westlich und südwestlich der Wasserscheide zwischen Oder und Elbe, gehört zum *Einzugsgebiet der Elbe*. Generelle *Grundwasserfließrichtung* ist von ESE nach WNW in den *Urstromtälern* und vom Niederlausitzer Grenzwall (Neubildungsgebiet) mit Grundwasserspiegelständen zum Teil oberhalb 100 m NN zum *Urstromtal* mit Grundwasserspiegelhöhen in 35 ... 50 m NN.

In der flächig aushaltenden *tertiären Schichtenfolge* im Vergleich zum genetisch bedingt fleckenhaften Verbreitungsmuster der Quartär-Ablagerungen besteht eine differenzierte Folge von GWL innerhalb von Grundwasserstockwerken mit der Entwicklung der *tertiären*

Schichtenfolge im Niederlausitzer Braunkohlerevier, vgl. nachstehende Tabelle und Abbildung.

	GWL	Seese	Meuro		
Flöz-Deckgebirge gelangt in Kippe	100	X	x	Quartär	
	200		X	Raunoer Folge	vielfach erodiert
	300	X	X	Obere Briesker Folge bis Oberbegleiter 1 (Unterbank)	
	400	X	X	Obere Briesker Folge bzw. Seeser Sande Oberbegleiter 1 bis 2. Miozänes Flöz	
	500	X	X	Untere Briesker Folge Sande und Schluffe (+LEG) zwischen 2. Miozänem Flöz und Unterbegleiter	< 200-400 m ³ /d, aber hydrochemisch geeigneter als Fe-reiche pleistozäne Talsande
	600			Sande zwischen Unterbegleiter 2. Miozänes Flöz und 3. Miozänes Flöz	
	700			Spremberger Folge	geringmächtig, wenig verbreitet
	800			Cottbuser Folge	durchweg rollig, FS
	900			Rupelbasissande	
	910			Calauer Schichten	
	920			Schönewalder Schichten	

Tabelle 7-1 Grundwasserleiter Niederlausitzer Braunkohlenrevier, X - vertreten im Tagebau Seese-Ost, Tagebau Meuro; LEG - Liegendentwässerungsgräben, nach Jordan & Weder 1995.

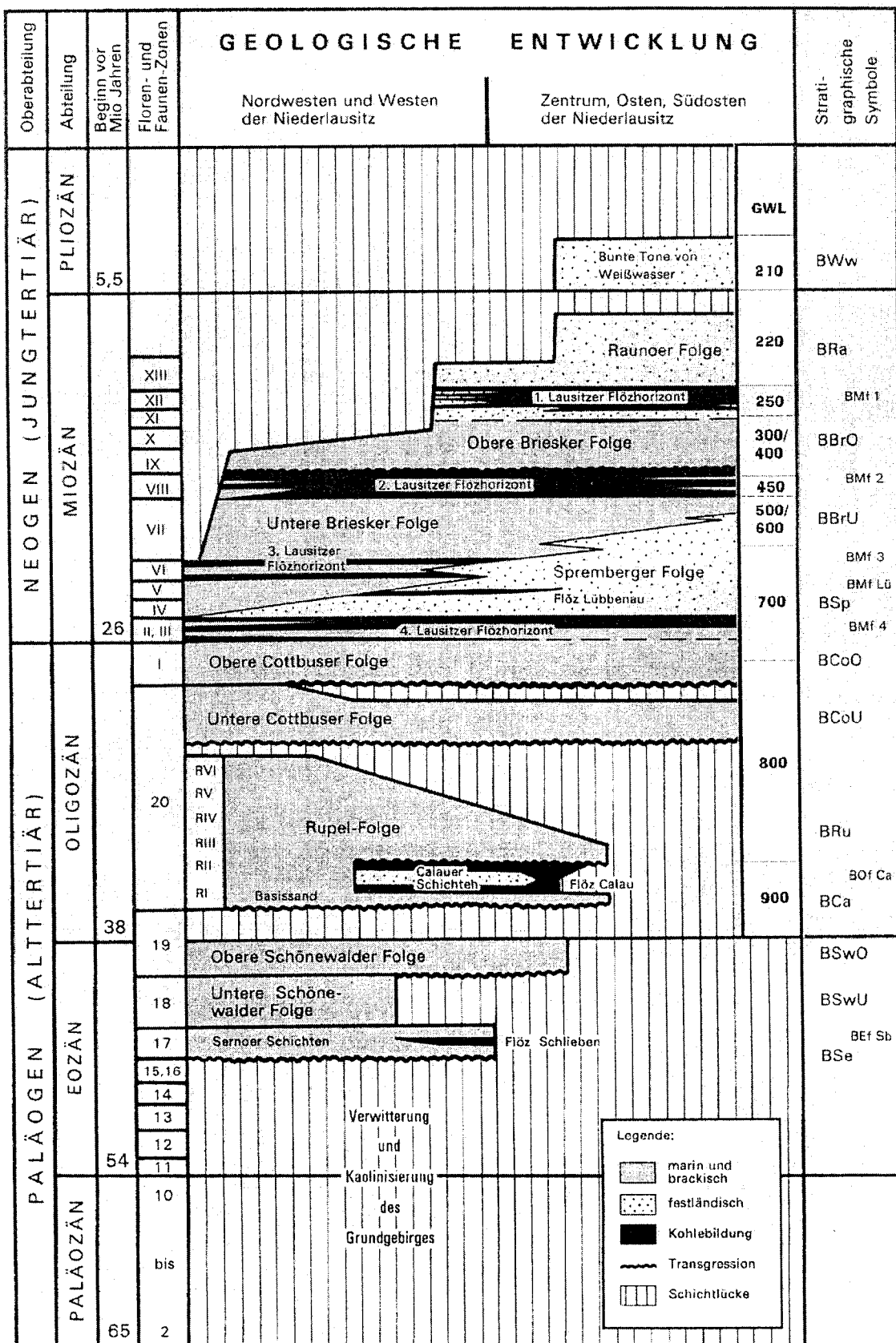


Abbildung 7-3 Die Schichtenfolge des Tertiär im Niederlausitzer Braunkohlenrevier mit Bezeichnung der GWL, Meinert et al. 1986 in Jordan & Weder 1995.

7.2.2 Hydrogeologische und hydrologische Merkmale der Tagebaue - vorbergbaulich - postmontan

7.2.2.1 Seese-Ost

Vorbergbaulich - Hochfläche/Becken - Im Deckgebirge des 2. Lausitzer Flözes im Kohlenfeld Seese überwiegen pleistozäne Ablagerungen, fluvioglaziale Sande, sandige Kiese und, zum östlichen Rand des Kohlenfeldes hin zunehmend bindige Sedimente Geschiebemergel bzw. Geschiebelehm. Für die *Hochflächen*, um 85 mNN gelegen, mit Grundwasserneubildung und Grundwasserflurabständen größer 5 m ist charakteristisch, daß sich *wasserhemmende bzw. –nichtleitende Geschiebemergel* in maximal 3 Lagen zwischen Wasserleiter schieben, so daß lokal bis zu 4 Grundwasserstockwerke vorliegen können. Auch wenn diese Wasserhemmer bzw. –Nichtleiter erhebliche Mächtigkeit erreichen; es überwiegen beim Flöz-Deckgebirge die *wasserleitenden* pleistozänen Sedimente, die miteinander verbunden sind und sich somit ein *hydraulisch einheitlicher Grundwasserstrom auf das Urstromtal* zu bewegt, Milde 1966. Bei durchlässiger Füllung wird die hydraulische Verbindung unterstützt durch die tlw. bis ins Prätertiär reichenden *pleistozänen Auswaschungsrinnen*. Tertiäre Sedimente sind im Hangenden des Flözes v.a. die „Seeser Sande“. Der Hangendschluff als potentieller Grundwasser-Hemmer ist häufig vollständig erodiert und die *gut durchlässigen* „Seeser Sande“ lagern direkt auf dem Flöz. Die Abtragung im Pleistozän hat sehr unterschiedliche Teile des ursprünglich einheitlich verbreiteten flözhangenden Tertiärs zurückgelassen, Milde 1966. In der Folge zeigt die *Pleistozän-Tertiär-Grenzfläche* ein unruhiges Relief, vgl. Abbildung 4-1, Abschnitt „Deckgebirgsgeologie - Bauschema AFB-Innenkippen“ und wegen der geringen lateralen Ausdehnung haben sich auch in den tertiären Sedimenten im Untersuchungsgebiet keine größeren gleichmäßigen, zusammenhängenden Grundwasser-Stockwerke ausgebildet.

Urstromtal – Bis an die Erdoberfläche um 50 m NN oder unter geringmächtiger Deckschicht holozäner anmooriger oder humoser Sedimente bilden durchschnittlich 20–35 m mächtige *Sande und Kiese (saaleglaziale Schmelzwasserablagerungen)* ein über das gesamte Urstromtal verbreitetes oberes Grundwasserstockwerk mit Flurabständen unter 2 m.

Grundwasserströmung (Richtung – Gefälle – Durchlässigkeit – Hydraulische Übergänge) – Die vorbergbauliche Grundwasserfließrichtung kann dem Grundwasser-Isohypsen-plan für das hydrogeologische Untersuchungsgebiet Schlabendorf entnommen werden, Abbildung 7-4. Danach besteht ein *von der Hochfläche im Süden zum Baruther Urstromtal* auffächerndes Muster der Grundwasserstromrichtungen.

Westlich der damaligen Bahnlinie Lübbenau – Calau strömte das Grundwasser dem kohlefreien Streifen der „Mehssow-Beuchower Rinne“ zwischen den Feldteilen Schlabendorf und Seese zu, SSE -> NNW. Im Bereich der Bahnlinie *von Süden nach Norden*. Östlich der Bahnlinie strömte das Grundwasser SSW -> NNE zum Urstromtal. Letztere Fließrichtung wurde wahrscheinlich von der später durch den Tagebau überbaggerten *Kahnsdorfer Rinne* im Seeser Kohlefeld vorgegeben. Innerhalb der Hochfläche des Seeser Raumes besteht ein Grundwasser-Gefälle von 0,21% (35 m auf 16,5 km) in Richtung Urstromtal, wo es 0,03 bis 0,04 % beträgt.

Durchlässigkeit – *Hochfläche*: charakteristisch ist der *Wechsel* von pleistozänen Grundwasserleitern mit kf (aus Siebanalysen) $2 \cdot 10^{-4} \dots 1 \cdot 10^{-3} \text{ ms}^{-1}$, max. $3 \cdot 10^{-3} \text{ ms}^{-1}$ mit *Grundwasser-Hemmern* bzw. –*Nichtleitern* (Geschiebemergel, Geschiebelehme); die tertiären Grundwasserleiter sind deutlich geringer durchlässig kf (Pumpversuche) $4 \dots 10 \cdot 10^{-5} \text{ ms}^{-1}$. *Urstromtal*: pleistozäne Sande und Kiese: einheitlich gut bis sehr gut durchlässig, kf $1 \dots 3 \cdot 10^{-3} \text{ ms}^{-1}$, Milde 1961. **Hydraulische Übergänge** - Die *hydraulische Anbindung* der Hochflächen an das Urstromtal erfolgt *direkt* über die bis 60 m mächtigen *Schmelzwassersande des Saale-Glazials* (Durchlässigkeitsbeiwerte $5 \dots 10 \cdot 10^{-4} \text{ ms}^{-1}$). Indirekt können die ins Urstromtal führenden **Pleistozänen Auswaschungsrinnen** beteiligt sein. Entsprechend ihrer Eintiefung teilweise bis in die prätertiäre Schichtenfolge *begrenzen sie häufig die Kohlenfelder*, Abbildung 7-5.

Abhängig vom Aufbau und Zusammensetzung ihrer „Füllung“ *beeinflussen* sie den Grundwasserstrom *in* - z.B. Kahnsdorfer Rinne mit durchlässiger Füllung - bzw. *um* die Kohlenfelder (verbinden randlich Grundwasser-Stockwerke miteinander) bzw. die neu entstandenen Innenkippenmassive. Über mögliche Entstehungsursachen und Eigenschaften dieses, in groben Zügen in der Niederlausitz SSE -> NNW (Hauptrichtung) und SSW -> NNE (Nebenrichtung) verlaufenden Systems von Auswaschungsformen informiert z.B. Kupetz et al. 1989.

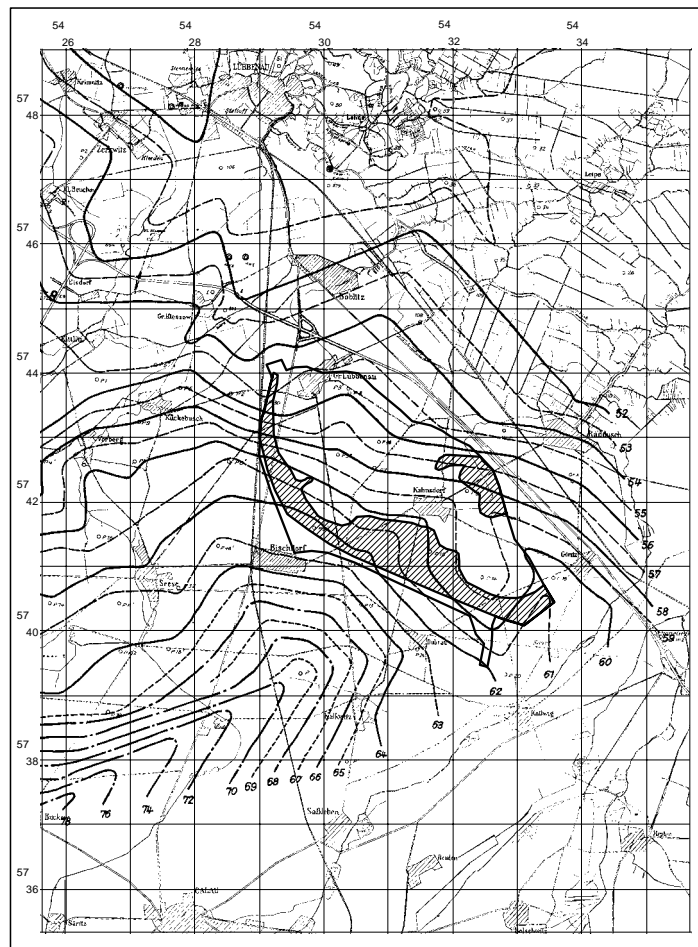


Abbildung 7-4 Hydrogeologisches Untersuchungsgebiet Schlabendorf, Kontur Tagebau Seese-Ost, „Bischdorfer See“ und „Kahnsdorfer See“ (im NE) schraffiert, Grundwasser-Isohypsen [mNN], Juli 1958, erweitert nach Milde 1961.

Der Zusammenstellung in BTU 1997 zufolge haben die Rinnen, die das Kohlefeld im Bereich Seese-Ost umgeben beim Grundwasseranstrom folgende Eigenschaften:

- im Norden und Nordosten die „Radduscher Rinne“: überwiegend rollig, d.h. durchlässig ausgebildet; Geschiebemergel und hangende Beckenschluffe im ursprünglich zum Abbau vorgesehenen Restblock am nordöstlichen Feldesrand *beeinflussen als bindige Ablagerungen jedoch den Grundwasserabfluß von Süden nach Norden.*
 - im Westen die „Bischdorfer Rinne“: nahezu vollständig aus bindigem Sediment, überwiegend Geschiebemergel. Sie wirkt sie als „Leitflanke“ der Grundwasserströmung *von Süd nach Nord* und behindert den Grundwasseraustausch zwischen Kippe Seese-West und Seese-Ost.
 - 2,5 km südlich Tagebau Seese-Ost die „Buckower Rinne“: nahezu vollständig aus Geschiebemergel (-80 m). Wird vom südlichen Grundwasserzufluß „unterströmt“; leeseitig werden etwas tieferliegende GW-Stände gemessen, Thiernig (mdl. Mittlg.) 1/2002.
 - im Osten „Vetschauer Rinne“: gut durchlässige pleistozäne Sandablagerungen.
-

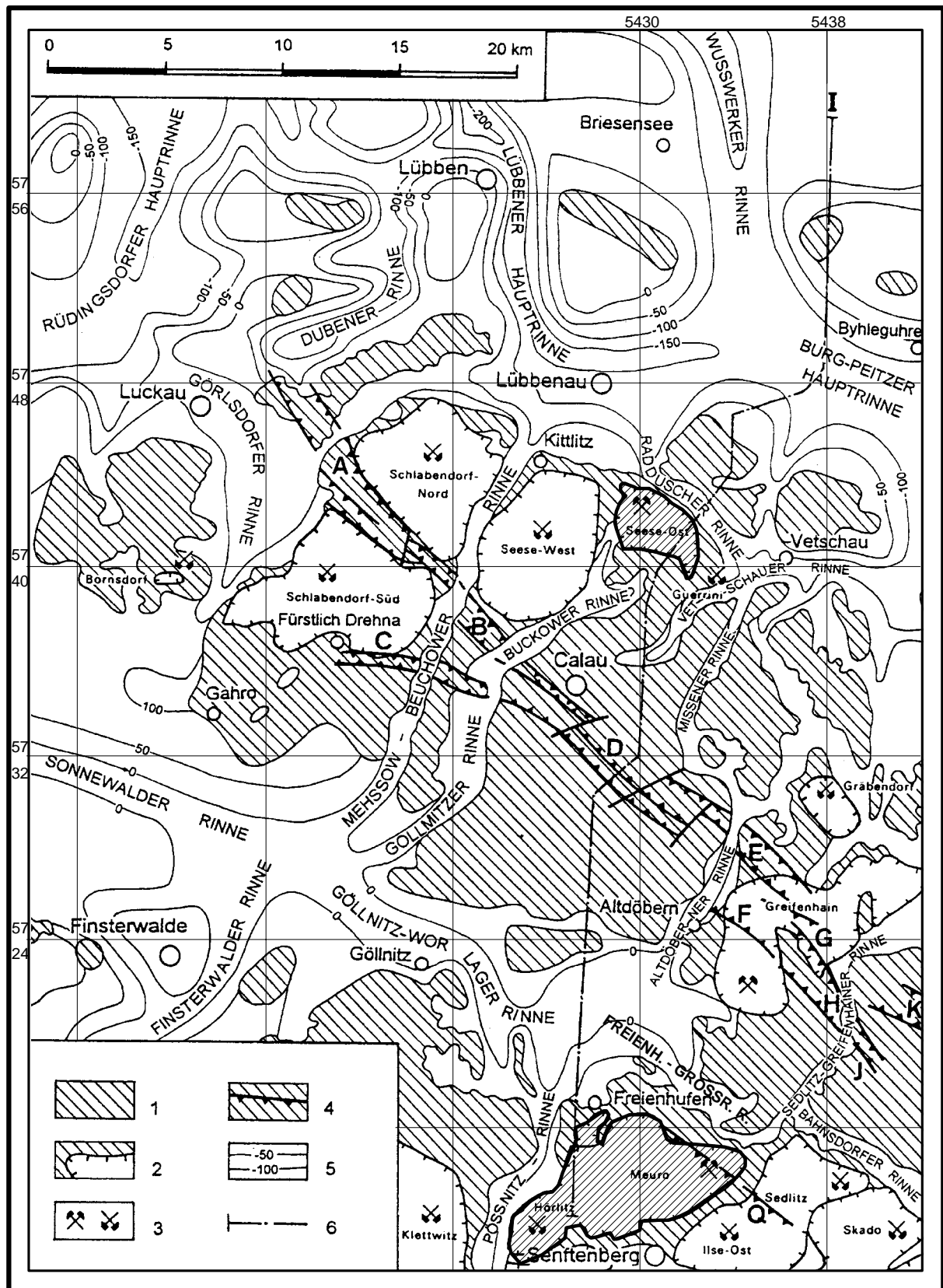


Abbildung 7-5 Lage Tagebau Seese-Ost (Bereich der Nordfelder) und Tagebau Meuro (Zentralrevier um Senftenberg) im System der häufig kohlenfeldbegrenzenden pleistozänen Rinnen des Niederlausitzer Braunkohlenreviers, Legende: 1-Zweites Lausitzer Flöz, 2-Braunkohlentagebau, 3-Grube in bzw. außer Betrieb (1993), 4-Störung im Lausitzer Flöz, 5-Isohypsen Quartärbasis in tiefen Rinnen außerhalb Braunkohlefelder, 6-Spurlinie ... entfällt, verändert nach Nowel 1995.

Flutung Restlochsee/Grundwasseranstieg – postmontan

Außer der neu entstandenen *AFB-Innenkippe* bilden der aus dem Restloch 23 zu entwickelnde *Bischdorfer See* sowie der Ausbau einer *Tieflage* der Brückenkippe* zum *Kahnsdorfer See* die *Randbedingungen* für die Vorgänge beim Grundwasserwiederanstieg und die nachbergbaulichen Grundwasserverhältnisse.

*Massendefizit: Abraumverkipfung außerhalb des Tagebaus. Der hier stark bindige Abraum hätte eine ausreichend standsichere Vorkippenschüttung nicht ermöglicht. Massendefizit zudem durch Strossenverlängerung in Aufschwenkrichtung, Thiemig (mdl. Mittlg.) 1/2002.

Im SW des Tagebaus wurden maximal 8 m Abraum (Vorschnitt) *nicht im Tagebauraum* Seese-Ost verkippt (Tagebau Seese-West). Im angrenzenden Bereich dieser ehemaligen Hochlage mit Grundwasserstand bei 62 m NN liegt der Seespiegel des künftigen Bischdorfer Sees bei 57,3 m NN. Mit dem nur 1 m tieferliegenden Spiegel des Kahnsdorfer Sees im NE` Tagebaurand stellt sich im Vergleich zum vorbergbaulichen ein *geringeres GW-Gefälle* ein.

Jahr	Spiegelhöhe ① m NN	Bemerkung	GW-Zuflüsse zum Bischdorfer See, Herkunftsraum	GW-Abstrom vom Bischdorfer See
postmontan		flurnahe GW-Stände	aus Anstehendem im SW, W (Calau-Dubrauer Hochfläche)	nach N bzw. NE, Passage AFB-Innenkippe, etwas Anstehend an E-Flanke im Abstrom „Innerer Oberspreewald“, Wasserfassung Vetschau
		Anbindung Kahnsd. See an Vorflut		
6/2005	57,3 (268 ha)	Endwasserspiegel, eingeleitete Wassermenge reduziert auf dauerhaft 0,15 m ³ /s mittl. Seetiefe Bischd. See 23 m mittl. Seetiefe Kahnsd. See 3 ... 4 m		
6/2004	56,3	Bischdorfer See -> Kahnsdorfer See (0,2 m ³ /s)		
1/2002	50	geschlossener Wasserkörper ab 50 ... 51,5 m NN		
			während Flutung mit Fremdwasser kaum GW-Zufluß, insbesondere nicht aus N, „Kippen-GW“ im N` Randbereich (AFB-Innenkippe) mit hohem Versauerungspotential.	in alle Richtungen vom Bischdorfer See weg
		östlicher Flachwasserbereich ab 41 ... 42 m NN		
		westlicher Grabenbereich 30 ... 33 m NN (Seetiefstes) zuerst geflutet		
Ende 1998		Beginn Flutung mit Fremdwasser (aus Südumfluter Spree)		
1997	20		von Osten (trockene Kippe)	

① Kippenwasserspiegel, Seewasserspiegel, *Flutung* – Zufuhr von Fremdwasser, Flußwasser.

Tabelle 7-2 Ablauf Flutung Restlochseen Tagebau Seese-Ost, zusammengestellt aus BTU 1997 und Sanierungsplan Tagebau Seese-Ost.

7.2.2.2 Meuro

Vorbergbaulich - Das Kohlenfeld Meuro liegt nordöstlich am *Rand des Lausitzer Urstromtals* im Bereich der bereits durch den Oberflözbergbau weitgehend abgetragenen „ehemaligen“ *Raunoer Hochfläche (Tertiärhochfläche)* mit vorbergbaulichen Erhebungen bis 150 m NN (Grundwasserflurabstand > 5 m) über sonst flachem Terrain um 102-130 m NN. Der Tagebau Meuro gehört zum Einzugsgebiet der Schwarzen Elster/Elbe.

Grundwasserströmung - *Vorbergbaulich* strömte das auf der Raunoer Hochfläche neugebildete Grundwasser von der Hochfläche in Richtung Süden und Südosten *dem Urstromtal zu*.

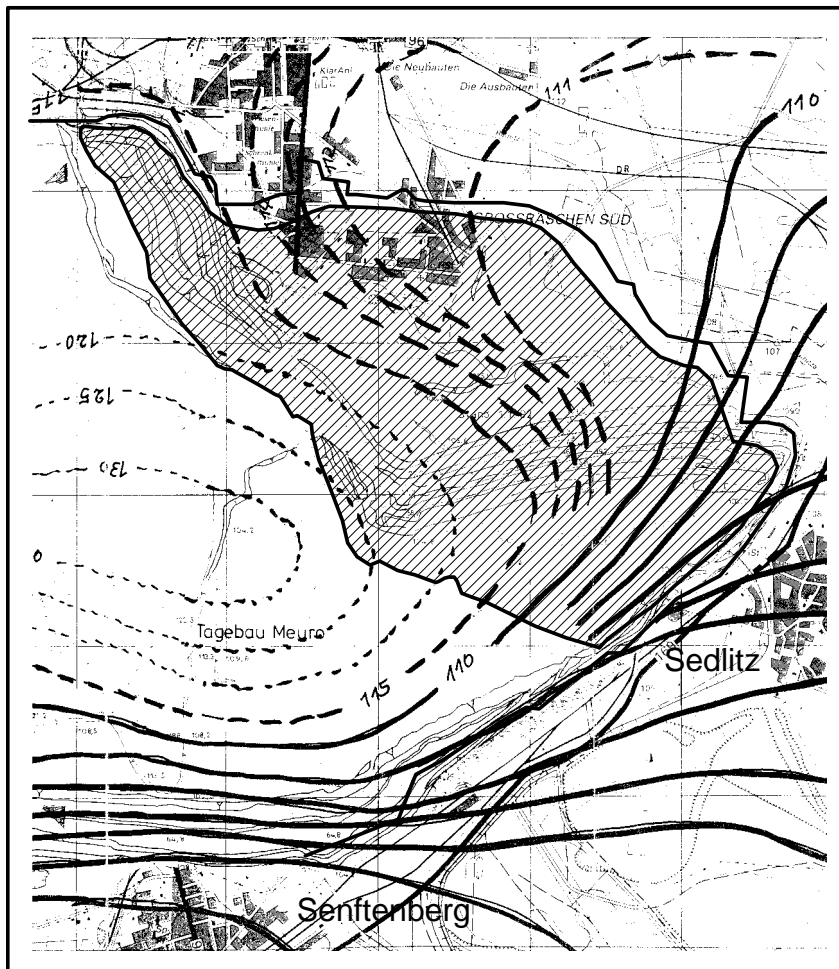


Abbildung 7-6 Gebiet Tagebau Meuro – Teilfeld Großräschen, „Ilse-See“ schraffiert, Grundwasser-Isohypsen [m NN] 1 : 50.000 – Grundwasserabstrom von der ehemaligen Raunoer Hochfläche in Richtung Süd und Südost zum Urstromtal, erweitert nach LMBV.

Bevorzugte Grundwasserwege in der *Umgebung des Tagebaus Meuro* sind die *pleistozänen Rinnen*. Im *Westen* die Pöbnitz-Rinne, im *Nordosten* die Sedlitz-Greifenhainer Rinne (überwiegend rollig, d.h. durchlässig), im *Süden* die Buchwalder Rinne und im *Norden* die Freienhufener-Großräschener Rinne.

Im Urstromtal fließt das Grundwasser mit 0,1 – 1 % Gefälle in *nördlicher bzw. nordöstlicher Richtung* in - unter *weichselzeitlichen Talsanden* - vergleichsweise zum Baruther Urstromtal wesentlich geringmächtigeren (25-45 m) *saale- und elsterkaltzeitlichen, gut durchlässigen Sedimenten* auf Tertiär. Die südliche Urstromtalseite wird, nach weitgehender Erosion des Tertiärs von grundwasserstauender Lausitzer Grauwacke gebildet, Jordan & Weder 1995.

Flutung Restlochsee/Grundwasseranstieg – postmontan

Außer der neu entstandenen *AFB-Innenkippe* bildet der aus dem Restloch Meuro zu entwickelnde *Ilse-See* *neue Randbedingung für die Vorgänge beim Grundwasserwiederanstieg*. Ausschlaggebend für die Anforderungen an die Seewasserqualität ist die vorgesehene Anbindung des Ilse-Sees *an die Vorflut, Schwarze Elster*.

Einen Großteil der *Seebodenfläche* des künftigen Ilse-Sees bildet – gegenüber häufig der Flöz-Liegendfläche als Seeboden – die Abraummischung im oberen Teil der *AFB-Innenkippe*. Ursache ist die starke Erweiterung des Restlochs Meuro durch Abraumabnahme aus der AFB-Kippe, Bereich Teilfeld Großräschchen. Mit diesen Massen wird der Südrandschlauch zum Stadtgebiet Senftenberg hin geschlossen, geländegleich aufgefüllt (ca. 107 m NN).

Vor allem im zentralen Tagebaubereich liegen die postmontanen Grundwasserstände infolge des Abtrags der Kippen des Altbergbaus (Raunoer Hochfläche) und Verkippung in andere Teilflächen, Tagebau Meuro *unterhalb der vorbergbaulichen*.

Damit in den *randlichen Bereichen* mit bereits vorbergbaulich flurnahen GW-Ständen diese nicht überschritten und vernähte Bereiche entstehen, ist als Endwasserstand des Ilse-Sees nicht 103 m NN wie ursprünglich für Retentionsflächen (Hochwasserschutz) vorgesehen, sondern 101 m NN + 0,25 m Hochwasserspeicher. Vorbergbauliche GW-Stände werden damit nicht überschritten, aber *flurnahe Grundwasserstände* um 2 ... 3 m sind um den Ilse-See zu erwarten. Die *den künftigen Ilse-See entwässernde Rainitz* ist daher vertieft worden.

Jahr	Spiegelhöhe ① m NN	Bemerkung	GW-Zuflüsse zum Ilse-See, Herkunftsraum	GW-Abstrom vom Ilse-See
postmontan		flurnahe GW-Stände, Gelände ~ 104 ... 106 m NN	im stationären Endzustand 60% GW-Zustrom aus S, SW (Kippe Meuro), Wiederversauerungsgefahr für Ilse-See (Nachsorge erforderlich)	kein nennenswerter GW-Abstrom, da Bilanzausgleich durch Oberflächenabfluß
2035	101,0	ohne Fremdwasser		
2015	101,0	bei alternativem Flutungsregime		
2013	101,0 (1.400 ha)	Endstand, Flutungsende mittl. Seetiefe 20 m (max. 56 m) Seeboden ~ 80 m NN	aus Kippe und Anstehendem	kein nennenswerter GW-Abstrom, da Bilanzausgleich durch Oberflächenabfluß
2010	73,5			
			in allen Phasen der Flutung: aus W: nach Passage Kippe Meuro aus E: nach Passage Kippe Sedlitz über Restpfeiler Anstehendes (GW II) aus N: nach Passage Anstehendes (schwach gepuffert) (GW I) aus S, SW: nach Passage Kippe (GW III)	
		von Beginn an in tiefsten Seebereich (aufgefüllt auf 65 m NN), um aufgehendes GW zurückzudrängen		
1/2005		Beginn Flutung mit Fremdwasser (0,5 m ³ /s aus GWRA Rainitz)	v.a. aus der Kippe, untergeordnet aus dem Anstehenden	
2004		Einstellung Wasserhaltung		
2002		bis 2004 schrittweise Reduzierung der Wasserhaltung	GW-Anstieg in Kippe	
2000	42,0	unter Liegendes 2. Lausitzer Flöz		
1998	50 ... 60 m unter Gelände	Randriegel im N, E und innerhalb Tagebau zur Entwässerung	Anstrom Randriegel; GW-Beprobung aus „trockener Kippe“ im für Wasserbeschaffenheit Ilse-See maßgebenden S'-Anstrombereich schwierig	-

① Kippenwasserspiegel, Seewasserspiegel.

GW I: Grundwasser des bergbaulich (weitgehend) unbeeinflussten Anstehenden - GW II: Grundwasser des bergbaulich beeinflussten Anstehenden - GW III: Kippengrundwasser.

Tabelle 7-3 Ablauf Flutung „Ilse-See“, Tagebau Meuro, zusammengestellt aus BTU 1998 und Sanierungsplan Meuro.

7.3 Der Anstieg des Grundwassers in die AFB-Innenkippe Seese-Ost

Das aufgehende Grundwasser erreicht eine sukzessiv verändert zusammengesetzte Abraummischung. Das für 5m-Scheiben ermittelte durchschnittliche „stoffliche Inventar“ repräsentiert die Zusammensetzung der Abraummischung über die untersuchte Kippenfläche Seese-Ost und zeigt deutlich einen *vertikalen Gradienten*, Abbildung 7-7. Die vertikale Veränderung ist Ausdruck erstens der systematischen Änderung des Parameterwertes in jedem einzelnen Schüttungsbereich (Bohrung) im Mittel aller Bohrungen sowie zweitens der *Überlagerung* der für die Schüttungsbereiche in unterschiedlicher Tiefenlage einsetzenden Änderungen.

In der Tendenz nimmt die FeS_2 -Konzentration zum Hangenden der Schüttung ab, die CaCO_3 -Konzentration zu. Vom Eintritt des aufgehenden Grundwassers in den Kippenkörper an bis zum Erreichen des höchsten Kippenwasserspiegels wird die potentiell entstehende Säure vollständig gepuffert, es verbleibt „unverbrauchtes“ Karbonat in der Kippe.

25-45 m NN - Bereich

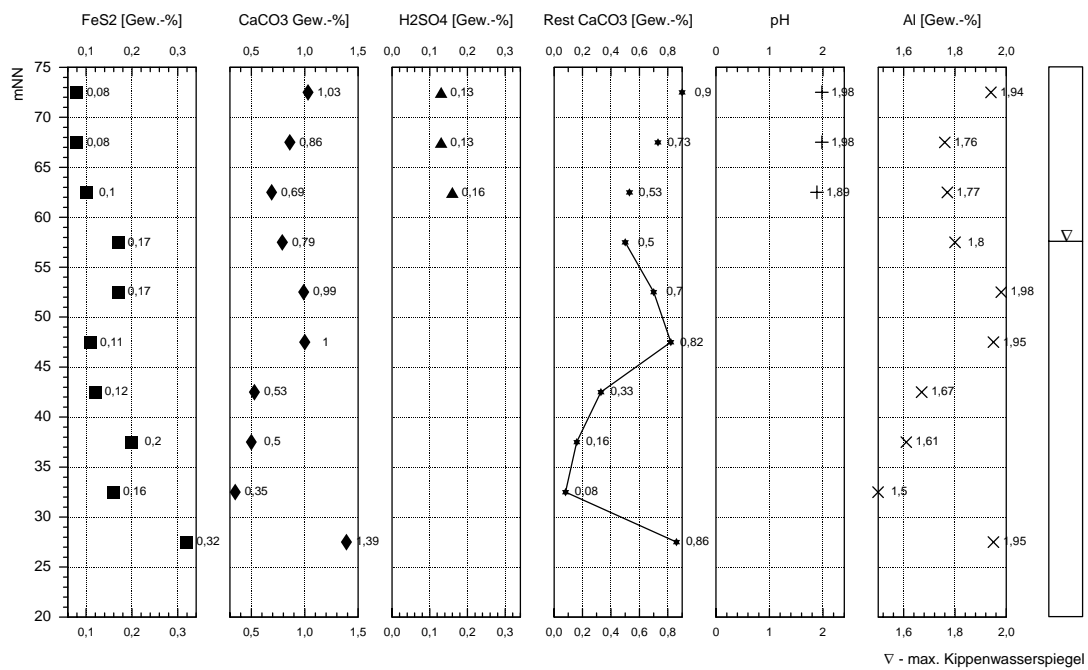
Die infolge Flözfreilage in die Abraummischung gelangende *Flözkohle (ugk)* ist als Eintragsweg für in der Abraummischung enthaltenes FeS_2 maßgeblich und flächenhaft wirksam für die Kippe Seese-Ost. Die *Hangendschluffe* sind im Kohlenfeld Seese nicht flächenhaft verbreitet. Dementsprechend ist die kohlige Substanz und darin enthaltenes Sulfid in der Kippe nur *lokal* enthalten. Zudem treten im Tagebau Seese-Ost die Hangendschluffe verzahnt mit den *Seeser Sanden* (schluffarme Quarzsande) auf, werden im Tiefschnitt erfaßt und als *Mischung* verkippt, vgl. Abschnitt „4 Deckgebirgsgeologie - Bauschema der AFB-Innenkippen.“ Höhere Sulfid-Konzentrationen wurden dementsprechend in der Abraummischung Seese-Ost nicht ermittelt.

Obwohl die Flözkohle (ugk) in Seese-Ost schwefelreicher (sulfidreicher) ist als in Meuro, vgl. Abschnitt „6.2.5 Gesamtschwefel“, betragen die maximalen Sulfidgehalte der im Mittel 33,5 m mächtigen Abraumschüttung in Seese-Ost im Vergleich zur 50-60 m mächtigen Abraumschüttung Meuro mit 10-11 m mächtigem Hangendschluff nur etwa 20 %. Ausnahme: vom Liegendschluff in der Zusammensetzung beeinflusster Basisbereich mit 0,32 % FeS_2 .

Abbildung 7-7 (folgende Seite) Entwicklung der Kippenwasserbeschaffenheit in 5 m Aufstiegs-Scheiben der AFB-Innenkippe Seese-Ost; oberhalb höchster Kippenwasserspiegel:

Sickerwassereinfluß. Die Bedingungen zur Aufstellung der Bilanz aus Versauerungs- und Pufferreaktion sind im Abschnitt „7.1.3.1 Grundwasseranstieg (unterer Teil)“ erläutert.

AFB-Innenkippe Seese-Ost - Entwicklung der Kippenwasserbeschaffenheit in 5 m Aufstiegs-Scheiben
Sickerwasserbeschaffenheit oberhalb maximaler Kippenwasserspiegel



Im hier betrachteten Teufenintervall gehen die ermittelten FeS₂-Gehalte im Durchschnitt auf 0,12 % zurück. Dieser *FeS₂-Abnahme* steht eine leicht auf 0,53 % *zunehmende Menge puffernder Substanz* gegenüber.

Entsprechend der Tragfähigkeitsvorgabe für die *Vorkippenschüttung* mit < 15 % Feinkornanteil werden die im Tagebauraum anstehenden bindigen Geschiebemergelmassen in die *oberen Abschnitte* des Abraumschüttungskörpers verkippt. Auch die *unteren Abschnitte* des im Schwenkende ST7, ST10 und im Bereich SS5 jeweils im oberen Abschnitt verkippten Geschiebemergels sind durch vergleichsweise zu den übrigen Bereichen der Abraumschüttungen hohe Pufferführung gekennzeichnet (möglicherweise aus der Beeinflussung des Liegenden durch Sickerwasser) und stehen zur Pufferung in diesem Vertikalabschnitt der Kippe zur Verfügung.

Die Abraummischung des Teufenabschnitts ist mit *einheitlich 10-5 bis 2,5 10-4 ms-1* entsprechend der geringen Feinkornanteile der überwiegenden Schüttung für die Vorkippe relativ gut *durchlässig bis stark durchlässig*. Das Teufenintervall des Kippenkörpers liegt im Niveau des GWL 500 mit 1 ... 3 10-4 ms-1 und des 2. LF.

45-60 m NN – Bereich (57,3 m NN Soll-Wasserspiegel Bischdorfer See)

Auf ein Minimum bei 48 m NN zurückgehende und darauf leicht wiederansteigende Sulfidanteile kennzeichnen diesen Teufenabschnitt der Kippe, in dem *Wechselwirkungen mit dem Restlochsee* Bischdorfer See (Seeboden im Mittel bei 34 m NN) möglich sind. Die Puffermengen erreichen in diesem *oberen Teil* der Kippe den maximalen Wert, was auf die hier geschütteten *bindigen Massen* zurückzuführen ist (Vermeiden von Zusetzen der *tiefschüttenden Schurre*).

Generell ist in den Tagebauen/AFB-Innenkippen *dieser Quartärgeologischen Zone* mit ähnlichem Deckgebirgsaufbau (geringe Mächtigkeit, nicht durchgehende Verbreitung, Verdünnung durch „Seeser Sande“ der bindigen *Hangendschluffsedimente* und verbreitet karbonathaltige Grundmoränensedimente) weitgehend die Pufferung des sauren Kippenwassers zu erwarten.

Der Seeboden des Kahnsdorfer Sees, angelegt in *kippentechnologisch verursachter Tieflage*, *Bohrung ST7* (Massendefizit infolge Strossenverlängerung) liegt im Niveau der Abraummischung mit hohem Geschiebemergelanteil und dementsprechend Puffervermögen. In Verbindung mit der Nähe zur Atmosphäre ist die Abscheidung von Fe(OH)₃ in diesem Bereich wahrscheinlich.

Mit dem Geschiebemergel werden neben dem puffernden *Karbonat* gleichzeitig maximale Gehalte an *Aluminium* in der Abraummischung angetroffen. Die in etwa gegenläufige Veränderung der Al- und FeS₂-Gehalte in der Schüttungsfolge ist Ausdruck wenig enthaltener Hangendschluffsedimente in der Abraummischung Seese-Ost und stellt einen wesentlichen Unterschied zur Abraummischungsfolge von Meuro dar.

Das kombinierte Auftreten von *Ton und Calcit* als petrographisches Merkmal des Geschiebemergels und die Bilanz der Kippenwasserentwicklung im Liegenden ohne verbleibende Säure spricht gegen die Freisetzung von Aluminium der Tonminerale und anderer Stoffe der Abraummischung.

Für die *Wirksamkeit des Puffers* gilt, daß sich dessen maximale Gehalte in der Abraummischung im mittleren Strossendrittel und v.a. im Schwenkende befinden, also im Abstrombereich des Grundwassers von der Kippe zum Urstromtal und daß auf der anderen Seite der *ufernahe Bereich zum Bischdorfer See* wegen der im Vorschnitt abgetragenen Geschiebemergel nur geringe Puffermengen aufweist.

Die Veränderung der *Durchlässigkeitsbeiwerte* in diesem Vertikalabschnitt im Kippenkörper ist geprägt durch die Verbreitung der hier verkippten Geschiebemergel. Zugehörige geringe *Durchlässigkeit* $1 \dots 5 \cdot 10^{-6} \text{ ms}^{-1}$ sind von SS5 im mittleren Strossendrittel und im Schwenkende im Osten des Tagebaus konzentriert, ST7, ST10. Im Bereich Bohrung ST15 wurden die *quartären Deckgebirgssedimente* im Vorschnitt gewonnen und im Tagebau Seese-West verkippt. „Einfassend“ im Norden, im Süden und im Drehpunktbereich sind *durchlässige* Sandabraummassen mit k_f überwiegend $1 \dots 5 \cdot 10^{-5}$, im Drehpunktbereich bis $2,5 \cdot 10^{-4} \text{ ms}^{-1}$.

60-75 m NN - Bereich

Das Relief ist charakterisiert durch Gefälle in Richtung Osten, Kahnsdorfer See. Die Abraummassen dieses Abschnitts liegen oberhalb des Soll-Wasserspiegels des Restlochsees (=Kippenwasserspiegel). In diesem Teufenbereich wird ausschließlich *Sickerwasser* des Niederschlags wirksam, die Produkte aus der Pyritoxidation werden bei Flurabstand von maximal 23 m zum Grundwasser verlagert.

Eine Wirkung des Puffers kann hier nur beim „Treffen“ von Sickerbahnen mit saurer Lösung auf Calcit/Ca²⁺ enthaltende Geschiebemergelbrocken erfolgen und bleibt deshalb wahrscheinlich unvollständig.

Im erkundeten Bereich der AFB-Innenkippe Seese-Ost treten außer um die Tieflage des *Kahnsdorfer Sees* und den Uferbereich zum *Bischdorfer See* keine GW-Flurabstände unter 3 m auf, so daß Sackungen infolge Korngefügeeinregelung beim Grundwasserwiederanstieg nicht zu erwarten sind.

Demgegenüber verbleiben in *Hochlagen*, wie charakteristisch für den *Drehpunktbereich* 10er m mächtige Abraumschüttungen in relativ lockerer Lagerung, Teufenprofile Porosität, Abschnitt 5.5.2. Eine Gefügeeinregelung durch Einwirkung von versickerndem Niederschlag hat nicht stattgefunden.

7.4 Der Anstieg des Grundwassers in die AFB-Innenkippe Meuro

Abbildung 7-8 zeigt, daß aufgrund der *Veränderung* des „stofflichen Inventars“ in der Abraummischung der AFB-Innenkippe Meuro beim Grundwasseraufgang eine *gravierende* und *systematische* Veränderung der Zusammensetzung des Kippenwassers zu erwarten ist. So verändern sich die *FeS₂-Gehalte* von 0,56 % (unterer Kippenbereich) auf über 1,4 % (95-100 m NN).

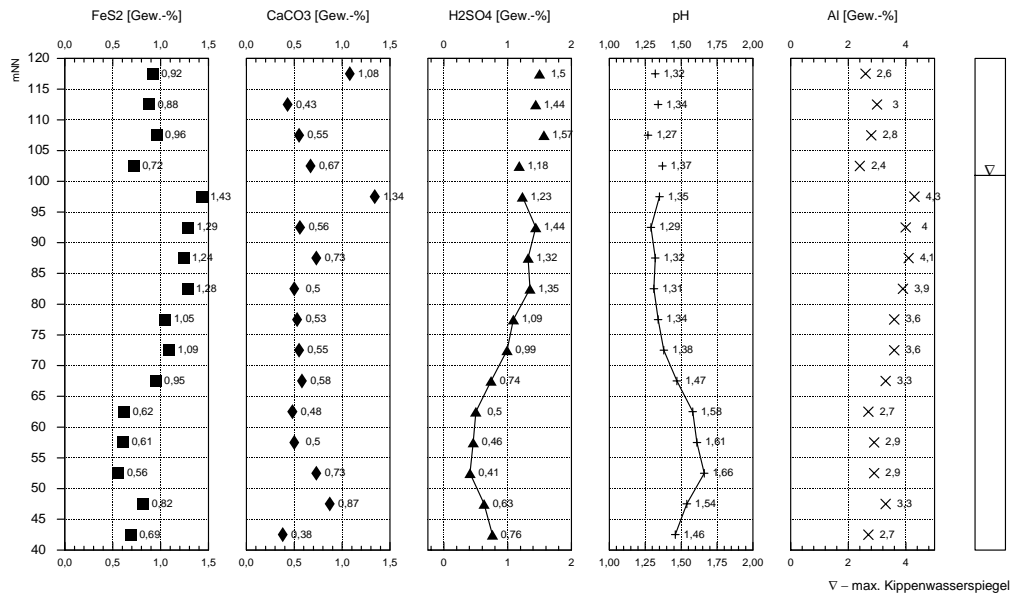
Signifikant über den Gehalten von Einzelbohrungen liegende FeS₂-Werte sind bereits im unteren Kippenabschnitt zu erkennen. Diese *Entwicklung im Vertikalprofil* des aus den Gehaltswerten des jeweiligen 5m-Intervalls über den gesamten Kippenkörper gewonnenen Wertes unterscheidet sich vom *abrupten Anstieg*, wie er für einzelne Schüttungsbereichen (Bohrungen) kennzeichnend ist. Neben den *Geologischen Faktoren*, der Topographie der Liegendfläche (Flözlage im Raum) und Mächtigkeitsvariationen ist als Ursache die Betriebsweise des Tagebaus im *Schwenkbetrieb* beteiligt. Entsprechend dem sich bei zunehmender Strossenlänge in Aufschwenkrichtung ergebenden Abraum-Massendefizit im Schwenkende entstehen dort *Tieflagen* und im Vertikalprofil der Schüttungsfolgen dort setzen z.B. die FeS₂-haltigen Hangendschluffmassen bereits in tieferliegenden Abschnitten der Abraumschüttung ein.

Eine, aus der Kombination der Faktoren entstandene Tieflagen-Situation wird deutlich in Profilschnitt 10 (MT1-MT5-MT8, dazu MS7) mit zunehmend tieferem Einsetzen des für FeS₂ maximalen Wertebereichs 1-2,5 % (Anlagenheft). Die entgegengesetzte Wirkung, zunehmende Mächtigkeit (*Hochlagen*) und eine höhergelegener Maximalwertebereich FeS₂ wird in Profilschnitt 7 (MT8-MT13-MT15) deutlich.

Dieser Effekt wirkt sich naturgemäß besonders bei Kippenmassiven mit starkem Relief der Liegendfläche und ausgeprägter Veränderung der Strossenlänge in Aufschwenkrichtung des

Tagebaus aus. Um *Fehlinterpretationen einzelner Bohrungen* bei der Geologischen Erkundung von Kippen zu vermeiden, ist er bei der Konzeption der Erkundungsbohr-Positionen zu berücksichtigen.

AFB-Innenkippe Meuro - Entwicklung der Kippenwasserbeschaffenheit in 5 m Aufstiegs-Scheiben
Sickerwasserbeschaffenheit oberhalb maximaler Kippenwasserspiegel



40-65 mNN - Bereich

Mit den in diesem Kippenabschnitt enthaltenen FeS₂-Mengen ist infolge Tieflage früh einsetzender höherer Mengen an puffernden Abraumbestandteilen, Schüttungsbereich Bohrungen MT8, MS7, MT10 und der im Schwenkende im Norden des Tagebaus verkippten Geschiebemergel, MT15, MT13 ein noch vergleichsweise *geringer verbleibender Säureanteil* zu erwarten. Entsprechend des entwickelten Kippenwasser-pH werden die in diesem untersten Kippenbereich vorliegenden bis 3 % Al somit voraussichtlich aus der Bindung an Ton- und Glimmerminerale gelöst.

Bei insgesamt nur *durchlässig* und überwiegend *schwach durchlässiger* (kf unter 10⁻⁶ ms⁻¹) Abraummischung Meuro sind in der Vorkippenschüttung in dem betrachteten untersten Abschnitt die durchlässigeren Massen konzentriert. Für die *Wasserwegsamkeit* beim Aufstieg des Grundwassers gilt, daß die Abraummassen im südlichen, nördlichen und östlichen Schwenkendenbereich mit Durchlässigkeiten bis 1 · 10⁻⁵ gegenüber dem Zentralteil des Kippenmassivs deutlich höhere Durchlässigkeiten aufweisen, den *Grundwasseraufstieg in diesen Randbereichen* begünstigen.

Bis zu 50 m NN stehen im Liegenden des 2. LF als gewachsener Grundwasserleiter die stark durchlässigen marin-brackischen Ablagerungen, GWL 500 mit 1 ... 3 · 10⁻⁴ ms⁻¹ an.

65-85 m NN – Bereich (80 m NN große Flächen Seeboden Ilse-See)

In dieser Phase des Grundwasseranstiegs *verdoppelt* sich die in der Abraummischung enthaltene Menge an FeS₂. Dieser Zunahme steht eine etwa konstant geringe Menge an puffernden Bestandteilen gegenüber. Der im Nordteil des Kippenkörpers (Bohrung MT13, z.T. MT15) verkippte *Geschiebemergel* bedeutet keine ausreichende Menge an pufferndem Abraum.

Tiefste Seebodenbereiche des künftigen Ilse-Sees werden bei 65 m NN, die größten Flächenanteile bei 80 m NN erreicht. Der aus *maximal FeS₂* führender Abraummischung bestehende Seeboden stellt im Vergleich zu den meisten anderen Restlochseen mit Böden im Niveau des *anstehenden* Liegendschluff mit geringerer Sulfidführung ein flächenhaft wirksames *starkes Säureintragspotential* dar.

Abbildung 7-8 (vorhergehende Seite) Entwicklung der Kippenwasserbeschaffenheit in 5 m Aufstiegs-Scheiben der AFB-Innenkippe Meuro; oberhalb höchster Kippenwasserspiegel: Sickerwassereinfluß. Die Bedingungen zur Aufstellung der Bilanz aus Versauerungs- und Pufferreaktion sind im Abschnitt „7.1.3.1 Grundwasseranstieg (unterer Teil)“ erläutert.

In dem Teufenintervall 65-85 m werden von ~ 3 auf 3,9 % zunehmende Al-Gehalte der zusammen mit Kohle, kohlig Substanz vorkommenden Tonminerale und Muscovit der Hangendschluffe mit dem schwefelsauren Kippenwasser reagieren und freigesetzt.

Das bereits im Abschnitt bis 65 m NN bestehende Muster von *durchlässigeren* (5 10⁻⁶ bis 5 10⁻⁵) Abraummassen in den *Schwenkendebereichen* im Süden, Osten und Norden und überwiegend *schwach durchlässigen* (10⁻⁷-10⁻⁶ ms⁻¹) Massen im Zentralen Kippenbereich wird mit dem raumfüllenden Einsetzen dieser *grundwasserhemmenden* Massen zwischen 65 und 75 m NN bestimmend und den Wasseraufstieg in *Bahnen in den Randbereichen* begünstigen.

Dem *gering durchlässigen zentralen Kippenbereich* entspricht weitgehend der Raum, in dem das aufsteigende Wasser ab 65-70 m NN auf maximale FeS₂-Konzentrationen trifft. Nach außen hin steigt diese Grenze an. Das bevorzugt im durchlässigen Kippenrandbereich (im S, E, N) aufsteigende Grundwasser wird die Reaktionsprodukte aus den hydrogeochemischen Reaktionen im Grenzbereich zu den zentralen, stärker FeS₂-führenden Kippenmassen aufnehmen.

85-101 m NN – Bereich (101 m NN Soll-Wasserstand „Ilse-See“ = Kippenwasserspiegel)

Die Abraummassen dieses Teufenintervalls fehlen inzwischen größtenteils in der erkundeten Kippenfläche; sie sind zur Auffüllung des Randschlauchs zur Stadt Senftenberg hin verwendet worden. Dabei wurde auch der aus der Melioration im Kippenoberflächenbereich (< 5 m mächtig) eingearbeitete Puffer entfernt. Ursprünglich hat dieser in unterschiedlicher Höhenlage zwischen 90-120 m NN zur Pufferung beitragen können. Das Teufenintervall entspricht i.w. dem Auffüllintervall des Restlochsees. Dem Abstrom des im Kippenmassiv aufsteigenden Wassers in den Restlochsee wird *bis zum Erreichen des max. Restlochseespiegels* durch die Flutung des Restlochs mit Fremdwasser begegnet, Luckner 1997.

101-120 m NN - Bereich

Nicht gesättigte Abraummassen oberhalb des künftigen Kippenwasserspiegels sind durch die Bohrung MT1 in Hochlage repräsentiert. Aus dem Säurebildungspotential des in dieser ungesättigten Zone enthaltenen Sulfids wird das *Grundwasser durch die Versickerung von Niederschlägen beeinflusst*. Der in Konzentrationen bis ~ 1 % enthaltene Puffer wird für eine Verbesserung der Sickerwasserzusammensetzung wenig beitragen, da *keine geschlossene Lösung* wie im Falle des ansteigenden Kippenwassers besteht.

7.5 Schlußfolgerungen – Die Kennzeichnung des „Reaktionskörpers AFB-Innenkippe“ für nachhaltige Sanierungsmaßnahmen zur Wiedernutzbarmachung der Bergbaufolgelandschaft

Das nach Ende der Braunkohlengewinnung im Tagebau wiederaufgehende Grundwasser gelangt sukzessive in die *Komponenten der Bergbaufolgelandschaft*, das sind entwässertes „Gewachsenes Gebirge“, den aus Abraummassen neu aufgebauten Untergrund der „AFB-Innenkippenmassive“ mit den Kippenrohböden und die entstandenen „Restlöcher“ mit den „Böschungen“ auf der gewachsenen und der Kippenseite. Da sich ein Gleichgewicht zwischen Wasser und Gestein erst einstellen muß, resultieren aus den hydrogeochemischen und bodenmechanischen *Reaktionen* Beeinträchtigungen und *instabile Zustände* für die Zeit des Wasseraufstiegs und darüberhinaus, die problematisch für die Nutzung der Bergbaufolgelandschaft sind.

- Entwicklung von *saurem Kippenwasser* und Folgereaktionen,
- *unbekannte hydraulische Eigenschaften* im Kippenmassiv, essentiell hinsichtlich Prognose der Grundwasserverhältnisse zur Eingliederung der AFB-Innenkippe in das künftige Strömungsfeld mit neuverteiltem unterirdischem und oberirdischem Abfluß (Vorflutanbindung, Vernässungsbereiche, Stoffausbreitung),
- *instabile Restlochböschungen*. Die *bodenmechanische Instabilität* vom Grundwasser angeströmter Restlochseeböschungen wirkt über Setzungsfließen mit großen Rückgriffweiten in die Kippeninnenflächen hinein.

Diese Probleme gehen vom mit der Geologischen Kippenerkundung gekennzeichneten „Reaktionskörper AFB-Innenkippe“ aus und wirken mit der in der Zeit des Grundwasseraufgangs entwickelten *Kippenwasserbeschaffenheit* in die Bergbaufolgelandschaft hinein. Direkt ist die Wirkung des Kippenwassers auf den Restlochsee.

7.5.1 Die langfristige Auswirkung der Kippenwasserbeschaffenheit

„Die sich im Kippenkörper formierende Grundwasserbeschaffenheit ist die zentrale Eingangsgröße des geochemischen Modells“ zur Quantifizierung der Immission ins abstromige Grundwasser“, Berger 2000. „Die Prognose der *zeitlichen Entwicklung der Kippenwasserbeschaffenheit* ist Voraussetzung für die Vorhersage der *Beschaffenheit* benachbarter Restseen und die Beeinflussung angrenzender Grundwasserleiterbereiche im Gewachsenen“, Boy & Häfner 2000.

Das Kippenwasser wirkt sich langfristig auf die Beschaffenheit angrenzender Gewässer aus und kann nicht als dauerhaft „abgeschottet“ gegen den Restlochsee betrachtet werden. „Abgeschottet“ ist es nur während einer ununterbrochenen „schnellen Fremdwasserflutung“ mit Wasserdruckgradienten in das Kippenmassiv hinein. Neben dem Wasserdruckgradienten aufgrund der vorauseilenden höheren Wassersäule im Restlochsee wirkt der *Dichteunterschied* zwischen „schwerem“ sauren Kippenwasser und „leichtem“ süßen Flutungswasser im Restlochsee. Wahrscheinlich gelangt bereits während der Flutung des Restlochs Kippenwasser (z.B. pH 3, 1,07 gcm⁻³, eisen- und sulfatreich) in das Restloch und *unterschichtet* das süße Seewasser (z.B. pH 6, 1,0 gcm⁻³). Das Austreten von Säure aus der Kippe in den Restlochsee „Senftenberger See“ Tagebau Niemtsch dauert, 30 Jahre nach Flutung des Restlochs bis heute an, Meinhardt 1997. Erkennbar ist es am ausgefällten Eisenhydroxid im Seeuferbereich. Ein kippenbürtiger Grundwasserstrom kann jahrzehntelang Säurekomponenten nachliefern, Ziegenhardt 2000. Außer der „primären Sanierung“ des Wassers des „kleinen“ Restlochsees Heide VI ist die *Nachbehandlung* des dem Restsee zuströmenden sauren Kippenwassers erforderlich, und zwar für mehrere Jahrzehnte, Fischer et al. 1998. 400 bis 4.000 Jahre (bei 10- bis 20-fachem Porenwasseraustausch) gibt Hülmeyer 2002 für den Austrag von Sulfat über Sickerwasser aus der Kippe Tagebau Cospuden an.

7.5.2 Praxis der Sanierung des Wasserhaushalts und Nachsorge, Rekultivierung

Für die Wiedernutzbarmachung bedeutet die „*Prognose der Grundwasserverhältnisse* und der *Wechselbeziehung* zwischen Grundwasser und Bergbaufolgelandschaft eine der zentralen Aussagen über *Funktionieren* oder Nichtfunktionieren, Nutzbarkeit oder Unbrauchbarkeit der Bergbaufolgelandschaft, Reichel et al. 1992.

Mit *sehr unterschiedlicher Bewertungsgrundlage* für diese Prognose werden in der *Sanierung* mit der Herstellung eines ausgeglichenen, sich weitgehend selbst regulierenden Wasserhaushalts (Grundwasser und Oberflächengewässersystem Restlochsee – Vorflut) und mit der *Rekultivierung* in der Hauptsache folgende Linien für das Erreichen einer „funktionierenden Bergbaufolgelandschaft“ verfolgt.

- 1.) **Schnelle Flutung** aller „größeren“ Restlochseen (> 300 ha) mit *Fremdwasser* (pufferndes Flußwasser), Luckner 1997. Mit dem Vorseilen des Restloch-Seespiegels gegenüber Grund- und Kippenwasserspiegel wird *gleichzeitig* die Gefährdung durch A.) „geotechnische Brüche“ der Restlochseeböschungen während des schnellen Wasseraufstiegs (macht allerdings die schnelle Herstellung „versteckter Dämme“ zur Böschungsstabilisierung erforderlich), B.) die Formierung schwefelsaurer Restlochseen

und C.) eine Verzögerung der Folgenutzung dieser Gewässer vermieden. Die von Luckner 1997 zugrundegelegte Beziehung „Beim *Eigenwasseraufstieg* hinkt der Wasserspiegel im Restloch dem Grundwasserspiegel in den meisten Bereichen des Umfeldes zeitlich hinterher“ kann nicht nachvollzogen werden.

- 2.) **Grundwasserferne Schließung des Restlochs** bei zu erwartender sehr schlechter Qualität des Restseewassers und verfügbaren geeigneten Massen, Karge 2001. Die Entscheidung für diese Maßnahme muß den Kostenvergleich umfangreicher „Erdmassenbewegung“ gegenüber „Herstellung eines gesunden Gewässers“ mit Böschungssicherung und Heranführung von Flutungswasser und/oder Wasserbehandlung berücksichtigen.
 - 3.) **Chemische und mikrobiologische Verfahren** zur Wasserverbesserung. Grundsätzlich sind zu unterscheiden: A.) Behandlung der *Abraummischung*, z.B. mit Kalk, Kölling 1990, Obermann 1991, Wisotzky 1994, B.) Herabsetzung der Azidität *im Restlochsee* durch Zugabe von Alkalisierungsmittel über tiefen Seeteilen und somit uferferner Ausfällung von $\text{Fe}(\text{OH})_3$, $\text{Al}(\text{OH})_3$. Herausnahme von SO_4^{2-} durch mikrobielle Sulfatreduktion, ermöglicht durch die Zugabe von organischem Material, z.B. Fischer et al. 1998, Teil II, III, C.) *Beeinflussung der Oxidations-Reaktion*, z.B. Verminderung der Sauerstoff-Zufuhr über die Luftfeuchtigkeit als *Nebeneffekt* des Auftrags der Abschlußschicht aus kulturfähigem Abraumsediment, Berger 2000.
 - 4.) Die **Rekultivierung** der entstandenen Kippenflächen entsprechend vorgesehener Nutzung (Wiedernutzbarmachung der vom Bergbau in Anspruch genommenen *Oberfläche*, §4, Abs. 4 BBergG). Die Voraussetzung eines stabilen „ausgeglichene[n], sich weitgehend selbst regulierenden Wasserhaushalts“ (Grundwasser und Vorflutregulierung) und somit Qualität der Prognose der Grundwasserverhältnisse liegt auf der Hand, wie Schäden durch das „Absaufen“ „Sterbender Waldflächen“ bereits aufgeforsteter Kippenflächen zeigen, Gatzweiler 1994.
 - 5.) **Monitoring** (Grundwasser, Kippenwasser, Restlochseewasser) der aktuellen Acidität, Fe_{ges} und SO_4^{2-} und *Revierwassermanagement* (Wasserdargebot gegenüber Sanierungswasserbedarf) auf längere Zeit, um unvermeidliche Planabweichungen beim Flutungsvorgang und Entwicklungen danach beherrschen zu können, Gockel & Seidel 1999, Ziegenhardt 2000, Freytag 2000, z.B. stärkerer Bedarf an Alkalisierungsmittel eines speicherbewirtschafteten Restlochsees infolge Seespiegelschwankung und Austritt von saurem Kippenwasser in den Restlochsee.
-

Die **Linie 1** verfährt im Hinblick auf die vordringliche schnelle Seenutzbarkeit gezwungenermaßen nach dem Prinzip „*Maximale Gegenwehr*“. Die Bilanz aus Versauerungs- und Pufferungspotential der Kippensedimente für die Kippenwasserentwicklung wird nicht aufgestellt, so daß erstens möglicherweise ausreichendes Eigenpufferpotential in der Kippe nicht bekannt und zweitens Dauer und Umfang der nach Flutungsende erforderlichen Nachsorge („Verdünnung“ und/oder Konditionierung) nicht bekannt ist, **Linie 2** nach *Einschätzung* über die voraussichtliche Entwicklung der Wasserbeschaffenheit im Restlochsee und **Linie 3** benötigt *genaue Information* über die Zusammensetzung der zu behandelnden Abraummischung bzw. das Restlochseewasser (genauer: „Primärsanierung“, vor weiterem Zustrom von saurem Kippenwasser), um mit der ausreichenden *Dosierung* der Zuschlagstoffe möglichst kostengünstig betrieben werden zu können bzw. die Herstellung und Förderung *geeigneter Milieus* für effektive mikrobielle Stoffumsätze zu gewährleisten.

7.5.3 Geologische Kippenerkundung – Kippenwasserbeschaffenheit

Analog zum Vorgehen bei der Rekultivierung, wo die *standortkundliche Kartierung* der Eigenschaftsverteilung im „Raum“ des Kippenrohbodens (2 ... 3 m Tiefe) dessen am besten geeignete Nutzung und Festlegungen für die Melioration ermöglicht, setzt Planung und Umsetzung der wirksamsten Sanierungsstrategie zur Herstellung eines mengen- und beschaffenheitsmäßig akzeptablen Wasserhaushalts und dessen Konstanthaltung die *Kennzeichnung des Reaktionskörpers AFB-Innenkippe* durch die Geologischen Kippenerkundung (GKE) voraus.

Die Geologische Kippenerkundung liefert mit dieser Kennzeichnung die *Entscheidungsgrundlagen* für Planung, Dimensionierung und Variantenfestlegung der nach BBergG vorgeschriebenen Sanierung zur Wiedernutzbarmachung der Bergbaufolgelandschaft und ist als Methode für die Beweissicherung von *Immissionen* geeignet, welche aus der *bisher nicht quantifizierten Kippenwasserentwicklung* beim Grund- bzw. Kippenwasseraufstieg und nach Erreichen des Zielwasserstandes herrühren.

Bewertungsgrundlage Maßgebend für die Kippenwasserbeschaffenheit und die langfristige Wirkung *sind die im gesamten Kippenraum* enthaltenen bzw. entstehenden Produkte der Sulfidoxidation, (v.a. gesamte potentielle Acidität) da diese beim Aufgang des Grundwassers in die Kippe aufgenommen werden. Die Produkte aus der Sulfidoxidation durch *Sickerwassereinwirkung* bedeuten davon nur einen Teil, z.B. „Abschätzung der Sickerwasserbelastung der Braunkohlenabraumkippe Cospuden (Mitteldeutschland)“,

Hülmeyer, 2002. Zu relativieren ist auch der Eintrag von Stoffen durch *Erosion* an der Kippenoberfläche und den Böschungen in den Restlochsee. Z.B. ergab die Untersuchung der dem Cospudener See zufließenden *Oberflächengewässer*, daß aufgrund der geringen Schüttungsmengen ihre zwar erhebliche Lösungsfracht an „ökotoxischen Schwermetallen“ mittelfristig keine Beeinträchtigung der Seewasserqualität darstellt, Hülmeyer 2002.

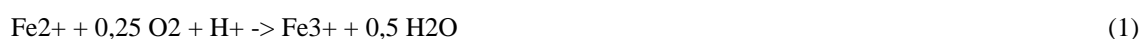
Entwicklung der Kippenwasserbeschaffenheit – Die Geologische Kippenerkundung liefert die Ausgangswerte zur Entwicklung der Kippenwasserqualität, die sich aus der Verteilung der FeS₂- und CaCO₃-Konzentrationen in den „Grundwasser-Aufstiegs-Zeitscheiben“ der Abraumschüttungskörper ergibt und ist Grundlage für die zielgerichtete Planung gegebenenfalls notwendiger Verbesserungsmaßnahmen.

Das geologische Aufschlußverfahren *Kernbohrungen* der Geologischen Kippenerkundung zur Raumdatengewinnung beinhaltet die Rückstellung von Proben und ermöglicht das Aufstellen von Stoffbilanzen für *künftig neu zu bewertende Beeinträchtigungen und zu entwickelnde Sanierungsmaßnahmen*, Beweissicherung.

7.5.4 „Nachsorge Schnell gefluteter Restlochseen“ auf unbestimmte Zeit

Bei der Flutung mit übergeleitetem Flußwasser eilt der Restlochseespiegel dem Kippen- bzw. Grundwasserspiegel voraus und es besteht ein *Strömungsgradient* vom Restlochsee in die Kippe bzw. Gewachsenes hinein. Bei Erreichen des Zielwasserstands und Seespiegelschwankungen setzt – wenn nicht gegengesteuert wird - eine, aus dem Grundwasser (Kippenwasser) seewärtsgerichtete Strömung ein. Damit treffen in der Flutungsphase zurückgedrängte aciditätsreiche Zuflüsse auf den Seewasserkörper, Gockel 2000.

Bereits vor Erreichen des Zielwasserstands kommt es beispielsweise infolge geringer Niederschlagsmengen zu *Unterbrechungen der Fremdflutung*. Die Versauerung des Seewassers hierdurch beschreiben Gockel und Seidel 1999 am Beispiel des Restlochsees Tagebau Gräbendorf. Das saure, Fe²⁺-reiche Kippenwasser wird aufgrund der höheren Dichte den Süßwasserkörper des Restlochsees *unterschichten*, an der Grenzfläche beider Wasserkörper Sauerstoff aufnehmen und zur Ausfällung von Fe(OH)₃ am Seeboden führen und durch Freisetzen von Protonen den Seewasser-pH hier herabsetzen. Die Exfiltration von Fe²⁺-haltigem Kippenwasser in Süßwasser erfolgt über:



Eine, in diesem Stadium mit restlochseewärtiger Strömung des Kippenwassers eigentlich erforderliche, *wieder verstärkte Kippenentwässerung*, um das sich in der Kippe bildende Kippenwasser zwischenzeitlich nicht weiter ansteigen und den hydraulischen Gradienten nicht umkippen zu lassen, findet *nicht* statt. Thiemig (mdl. Mittlg.) 4/2002 zufolge stehen aufgrund begrenzter jährlicher Etats bei der Sanierung *bodenmechanische Stabilisierungsmaßnahmen* gegenüber der Steuerung der Flutung zur Einflußnahme auf die Restlochseewasserbeschaffenheit im Vordergrund.

Spätestens für die *Entwicklung ab dem Zielwasserstand* müssen Vorbereitungen dafür getroffen sein, die bei der Flutung erreichte Seewasserbeschaffenheit aufrechtzuerhalten, denn in der Innenkippe befindet sich weiterhin saures Kippenwasser. Angelegt mit dem Prinzip der „Schnellen Flutung“ ist die *Durchströmung des Sees mit Oberflächenwasser* aus dem bereits zur Flutung genutzten Speicher- und *Überleitungssystem* der untereinander verbundenen Restlochseen. Dessen Kosten und Beitrag zur Gesamtlösung sind bei der Sanierungskonzeption künftig anderer Braunkohlentagebaureviere kritisch zu bewerten, Kinze 1997.

Ziel ist, mit diesem *Zustrom* von Oberflächenwasser einen Gradienten des Wasserstroms *in die Kippen hinein* aufrechtzuerhalten und/oder bei Austritt von saurem mineralisierten Kippenwasser dieses soweit zu *verdünnen*, daß das entstehende Mischwasser des Restlochsees, die zum Teil auch als Wasserspeicher fungieren (Spreeaufhöhung in Trockenperioden) in das öffentliche Gewässernetz, *Abstrom* geleitet werden kann. Entsprechend ihrer Wirkungsweise muß diese Nachsorge-Maßnahme „See-Durchströmung“ *auf Dauer* funktionsfähig gehalten werden, damit die „Einkapselung“ des sauren Kippenwassers im Kippenkörper gewährleistet ist.

Die *auf Dauer bestehende Veranlassung*, den *gestörten Zustand* aufrechterhalten zu müssen, spricht dafür, daß diese Vorgehensweise durch eine Maßnahme ergänzt wird, mit der in absehbarer Zeit ein Gleichgewicht erreicht wird. Dazu kommt, daß der Ungleichgewichts-Zustand labil ist, weil z.B. bei Wassermangelsituationen der Ausstrom von Kippenwasser in den Restlochsee erfolgt und spätestens im Abstrom *konditioniert* werden muß, bei fortwährend eingeschränkter Nutzbarkeit des Restloch-Gewässers. Für die notwendigen Steuersignale ist das mit dem Flutungsprozeß installierte *Monitoring* zur Messung bergbaurelevanter Beschaffenheitsparameter von Grundwasser, Kippenwasser und Restlochseewasser damit ebenfalls *auf Dauer* vorzuhalten. *Unbestimmt lange*, da man ohne die Ergebnisse der Geologischen Kippenerkundung nicht weiß, was an *Säurepotential in den Kippenkörpern* noch enthalten ist, nachdem z.B. Teilmengen bei Wassermangelsituationen

(„Umkippen“ des hydraulischen Gradienten), Erosion oder Böschungsabbrüchen in den Restlochsee gelangt sind.

Ein sich „weitgehend selbst regulierender Wasserhaushalt wird angesichts der Dauerhaftigkeit, der Störanfälligkeit und der, bei immer wieder erfolgreichem Umkippen des Strömungsgradienten notwendigen Konditionierung der Nachsorge „Oberflächenwasserdurchfluß“ *nicht erreicht*.

7.5.5 Dosierung und Platzierung kippenwasserverbessernder Maßnahmen zur Verkürzung der Nachsorgedauer „Schnell gefluteter“ Restlochseen

Die *anthropogen herbeigeführte Störung* der Wasserbeschaffenheit muß mit einem, in nach menschlichem Zeitmaßstab überschaubaren Zeitraum, *bis 2 Generationen* endgültig wirksam werdenden Verfahren wieder ein *stabiles Gleichgewicht* erreichen. Die *Herstellung einer Kippenwasserbeschaffenheit*, die problemlos Übergänge in angrenzende Grundwasserleiter und den Restlochsee zuläßt und den unregelmäßigen Grundwasserstrom durch diese Komponenten der Bergbaufolgelandschaft ermöglicht, muß *in ca. 150 Jahren* abgeschlossen sein.

Die Kosten für die damit verbundenen, vergleichsweise „kurzfristigen Anstrengungen“ (*Investitionskosten*) gegenüber Nachsorge auf unbestimmte Zeit (*Betriebskosten* zur Wassermengenregulierung Restlochseenkette, Monitoring, Konditionierung) sind, wie der erbrachte Aufwand für das Wasserspeicher- und Überleitungssystem in diesem Zeitraum aufzubringen.

Dazu wird vorgeschlagen, eine Kombination aus Alkalisierung des sauren Kippenwassers *in der Kippe*, vor Aufstieg des Grundwassers und wirksam für die Vertikalabschnitte mit maximalem Säurepotential und Behandlung *im Restlochsee* (Fällung von Fe- und Al-Hydroxiden und Kopräzipitation vorher mobilisierter Stoffe im Seetiefsten) vorzunehmen.

Mit den Ergebnissen aus der Geologischen Kippenerkundung kann diese Maßnahme wirkungsvoll gesteuert werden.

- 1.) **Dosierung** des Alkalisierungsmittels bzw. Herstellung eines geeigneten Milieus, z.B. anaerob für „aktive Bakterienbarriere“ zur Sulfatreduktion. Die Dosierung richtet sich nach enthaltenem *Säurepotential*, vorgesehenem *Behandlungszeitraum (150 Jahre)* und dem *Grundwasserdurchstrom*.
 - 2.) **Platzierung** des Alkalisierungsmittels aus Bohr-Kostengründen in möglichst geringer Tiefe, jedoch unterhalb Zone in der Kippe mit maximalem Säurepotential. Das
-

Alkalisierungsmittel ist *flächig einzubringen*, um maximale Sediment-Wasser-Interaktion mit dem aufsteigenden Kippenwasser und *Verteilung* im Kippenraum zu erreichen.

Die *Pufferwirksamkeit* des Alkalisierungsmittels ist am größten, wenn es am *Ende der „Fließstrecke“*, d.h. hier im aufsteigenden sauren Kippenwasser im Kippenkörper oben platziert ist. Dies zeigen Säulenversuche von Kölling 1990 und Hülmeier 2002.

Kippentechnologisch bedingt wird Bindiges in *obere Kippscheiben* verkippt, so daß dort lagernde *karbonathaltige* bindige Geschiebemergel günstige Voraussetzungen zur effektiven Pufferung darstellen.

- 3.) Die **Terminierung** vor Erreichen des Kippenteufenintervalls mit dem größten Versauerungspotential durch das aufgehende Kippenwasser, um gleichzeitig die *Verteilungswirkung* des aufsteigenden Wassers zu nutzen.
- 4.) geeignete **Aufteilung** von Behandlung Abraummischung bzw. Restlochseewasser. Bei pH-Erhöhung > 4,5 im aufsteigenden Kippenwasser bilden sich *Fe(OH)₃-Krusten* auch um Sulfidpartikel, so daß die Pyritoxidationsrate vermindert wird, Holmström et al. 1999. Diese zusätzliche Wirkung der Alkalisierung *in der Abraummischung* auf den Prozeß der „Pyritoxidation“ ist bei einer Behandlung des Seewassers mit Alkalisierungsmitteln nicht nutzbar.

Wassermangel-Situationen und/oder herbeigeführt im Flutungs-/Durchströmungssystem der Restlochseenkette müssen Grundwasserstromgradienten in die Restlochseen dafür verwendet werden, um mit *Behandlung im See*, z.B. mikrobiologische Sulfatreduktion das Sulfat und Eisen herauszunehmen, Klapper & Schultze 1998. Das System „Oberflächendurchfluß“ ist dementsprechend in diesen 150 Jahren aufrechtzuerhalten.

7.5.5.1 Monitoring

Die Einrichtung eines Grund- und Oberflächenwasser-Monitoringsystems (Zuflußmenge, Wasserspiegelentwicklung und Wasserbeschaffenheit) ergibt sich aus der bergrechtlichen Wiedernutzbarmachungsverpflichtung des Bergbautreibenden im Zusammenhang mit der *Sanierung des gestörten Wasserhaushalts* als gemeinschädlicher Beeinträchtigung.

Mit Maßnahmen zur Grundwassersanierung wie dem System „Schnelle Fremdwasserflutung“ nach *Bergrecht* gewinnt Monitoring Bedeutung bei Beantragung *wasserrechtlicher Zulassungen* für den Ausbau der Restlochseen. Das Sondermeßnetz Braunkohle hat das Ziel, die anstehenden Phasen der Grundwassersanierung, Flutung der Restlöcher und *Ergebnisfeststellung* eines sich weitgehend selbstregulierenden

Wasserhaushalts in der Lausitz über die nächsten Jahrzehnte zu „beobachten“, Freytag 2000. Da die sich in den neu entstehenden Gewässern des Braunkohlenbergbaus einstellenden Wasserqualitäten mittels „wissenschaftlicher Untersuchungen“ prognostiziert werden, ist ein Oberflächenwassermonitoring geboten (Wasserrecht), um den Prozess laufend zu beobachten, und mit Konditionierung einzugreifen (Prinzip Nachsorge).

Den Prognosen liegt bisher nicht die aus der Geologischen Kippenerkundung ableitbare *potentielle Acidität* für das Szenario der *Kippenwasserentwicklung* zugrunde. Das Monitoring registriert die *aktuelle Acidität*. Dies sagt nicht aus, wieviel Kippenwasser welcher Qualität in den Restlochsee und angrenzende GWL abströmen kann.

Die Kippen- und Grundwasserbeschaffenheit im Abstrom der Kippe ist erst mit der *teufenspezifischen Kippenwasserbeschaffenheit* wie aus der Geologischen Kippenerkundung erkennbar, sinnvoll zu interpretieren. Entgegen der überwiegend *reagierenden* Funktion rückt für das Monitoring mit dem vorgeschlagenen Eingriff zur Kippenwasserverbesserung die Funktion als *Nachweis* in den Vordergrund.

7.5.6 Geeigneter Zeitpunkt für die Geologische Kippenerkundung als Grundlage für bergbauliche Sanierungsmaßnahmen

Entsprechend ihrer *geo-technologischen Entstehung* und Zusammensetzung aus *Deckgebirgsmaterial* werden die Abraummischungskörper des Braunkohlentagebaus als Geologische Körper aufgefaßt und kippengeologisch erkundet. Vergleichbar, wie mit der „Schnellen Fremdwasserflutung“ der Restlochseen *gleichzeitig* Beeinträchtigungen durch „geotechnische Brüche“, Formierung schwefelsaurer Seen und Verzögerung der Seennutzung vermieden werden, wird mit dieser Methode durch die kombinierte Bestimmung petrophysikalischer und stofflicher Eigenschaften der *Reaktionskörper AFB-Innenkippe* hinsichtlich der hydrogeochemischen Reaktionen mit dem aufgehenden Grundwasser, d.h. Entwicklung der *Kippenwasserbeschaffenheit*, Ausbreitung dieses Kippenwassers und bodenmechanische Reaktionen, z.B. Sackung gekennzeichnet.

Mit der Geologischen Kippenerkundung werden vom Bergbauunternehmen die Untersuchungen *geführt*, die „zur Begründung der technisch, technologisch, ökologisch und wirtschaftlich günstigsten Sanierungsvariante, meist mit weitreichenden ökologischen, wirtschaftlichen und politischen Folgen, z.B. Beschäftigungswirksamkeit und Lösung der Interessenkonflikte hinsichtlich der Nutzungen notwendig sind“, Gatzweiler 1994.

„In den *aktiven Tagebauen* lassen sich die Fragen der Wiedernutzbarmachung, Restraumgestaltung und Wasserwirtschaft am effektivsten *in Verbindung mit dem laufenden*

Betrieb lösen“. Die Geologische Kippenerkundung wird somit, unterteilt z.B. in Jahresscheiben +- direkt im Nachgang der Verkippung durchgeführt werden können.

Innenkippen stillgesetzter Tagebaue des Sanierungsbergbaus – „passiver Bergbau“ – sind so unverzüglich wie möglich kippengeologisch zu erkunden. Die Durchführung dieser Arbeiten vor dem Aufgehen des Grundwassers kann auf weiterhin gesümpften, *sicher betretbaren Kippenflächen* erfolgen und im wesentlichen auf die Erfahrungen vorliegender Arbeit mit der Erkundung in diesem Stadium zurückgreifen.

Unumgänglich werden erhöhte Erkundungsaufwendungen z.B. mit Horizontalbohrungen für *nicht mehr betretbare Innenkippen*, in denen das Grundwasser/Kippenwasser bereits ansteigt.

7.5.7 Präventivmaßnahmen

Auf der Tagesordnung steht die Erarbeitung von Lösungen für die *bereits entstandenen AFB-Innenkippen* und deren Auswirkungen auf die Umgebung. Gesichtspunkte, die bei der Planung von Tagebauen bzw. der Tagebautechnologie berücksichtigt werden sollten:

Keine Inseln in Restlochseen - Beispiel Insel im Senftenberger See. Die Inseln aus Teilbereichen des Innenkippenkörpers sind *bodenmechanisch nicht stabil*. Sie werden nicht in ausreichender Höhe vom Grundwasserspiegel erreicht, der erst die konsolidierende Sackung hervorruft. Es besteht *dauerhaftes Betretungsverbot*. Zum anderen fließt nahe der *Wasseroberfläche eisenhaltiges saures Kippenwasser* aus der Innenkippen-Insel in den umgebenden Restlochsee (2001: See-Einlauf pH 7,5, See-Auslauf pH 4, Müller (LMBV) 2001. Beispiel Gräbendorf, wo die Kosten für die Böschungssicherung der gesamten Uferlinie der Halbinsel aufzubringen waren.

„Gezielter“ Kippscheibenaufbau – Bei der Verkipfung von Abraum mit geringem Aciditätspotential im Kippenkörper *oben* und hohem Aciditätspotential *unten*, um eine möglichst geringe Versauerung aus der Oxidation von der Kippenoberfläche zu erzielen, ist zu berücksichtigen, daß beim Grundwasseraufgang *in jedem Fall* die Reaktionsprodukte bereits stattgefundener Pyritoxidation ins Kippenwasser aufgenommen werden. Nach Betriebsablauf kippentechnologisch ohnehin nicht opportun, da sulfidführender Hangendschluff als *bindiges Deckgebirge* grundsätzlich in obere Scheiben verkippt wird.

Nutzen hydrodynamischen Sedimenttransports - Z.B. Kluge 1977, Förster et al. 1991. Das zur Restlochsee-Flutung verwendete Fremdwasser kann gleichzeitig zur Stabilisierung der gewachsenen Restlochseeböschung durch Herstellen einer *Spülkippe* genutzt werden, d.h. Abflachen oben, *Stützkörper* am Böschungsfuß, durch Transportmittel Wasser *dicht gelagert*. Gleichzeitig wird so die „Versiegelung“ der aufgeschlossenen Tertiärfolge, v.a. Hangendschluff-Sedimente erreicht.

8 Literatur

- AHRENS, H. & LOTSCH, D. (1976) Zum Problem des Pliozäns in Brandenburg.- Jahrbuch für Geologie (für 1971/1972), Bd. 7/8, S. 277-323.
- AHRENS, H. & LOTSCH, D. (1963) Marines Miozän in Südostbrandenburg.- Zeitschrift für Angewandte Geologie, 9, 135-137.
- APPELO & POSTMA (1996) Geochemistry, Groundwater and Pollution.- Balkema, Rotterdam, 1-536.
- ARNOLD, I. & MIETSCH, M. (2000) Strategien zu Monitoring und Prognose der Kippenwasserbeschaffenheit in den Braunkohlentagebauen der LAUBAG.- Freiburger Forschungshefte, C482, 46-52.
- AUTORENKOLLEKTIV (1984) (cit. in Kaubisch 1986) Grundwasserwiederanstieg in Kippen.- Zwischenbericht A3, Gemeinsame Forschungsgruppe des VEB BKK Senftenberg, Stammbetrieb und der Bergakademie Freiberg, unveröffentlicht.
- BAMBERG, H.F. & HÄFNER, F. (1981) Laborative Bestimmung von Porosität (Porenanteil) und Durchlässigkeit in Locker- und Festgesteinsproben.- Zeitschrift für angewandte Geologie, 27, 218-226.
- BERGER, W. (2000) Untersuchungen zu Stoffinventar und Stoffänderung durch Redoxreaktionen in Sedimenten des Niederlausitzer Braunkohlereviere – Quantifizierung von Immissionen ins abstromige Grundwasser.- Diss. BTU Cottbus, 1-151.
- BERNATZIK, W. (1947) Baugrund und Physik.- Schweizer Druck- und Verlagshaus, 1-310.
- BEYER, W. (1964) Zur Bestimmung der Wasserdurchlässigkeit von Kiesen und Sanden aus der Korngrößenverteilungskurve.- Wasserwirtschaft-Wassertechnik, 14, 165-168.
- BILZ, P. (1971) Beitrag zur Erfassung der Standsicherheitsverhältnisse an bindigen Mischbodenkippen mit Fließcharakter.- Freiburger Forschungshefte, A488, 1-147.
- BLOWES, D.W. & JAMBOR, J.L. (1990) The pore-water chemistry and the mineralogy of the vadose zone of sulfidic tailings, Waite Amulet, Quebec.- Applied Geochemistry, 5, 327-346.
- BÖHME (1980) Geotechnische Dokumentation für den Hangendschluff des 2. Lausitzer Flözes.- VEB BKK Senftenberg, Brieske Ost, unveröffentlicht.
- BÖNISCH, R. & SCHNEIDER, W. (1998) Erste Ergebnisse zur Mikroskopie von Pyrit-Einlagerungen in tertiären Sedimenten aus dem Lausitzer Braunkohlentagebau.- Proceedings des Dresdner Grundwasserforschungszentrums e.V., ISSN 1430-0176, Heft 13, 280.
- BÖNISCH, R. (1994) In: NOWEL, W., BÖNISCH, R., SCHNEIDER, W., SCHULZE, H.: Geologie des Lausitzer Braunkohlenreviers.- Festschrift der LAUBAG zum 500. Geburtstag von Georg Agricola, 1-102.
- BOREK, S.L. (1994) Effect of humidity on pyrite oxidation.- In: ALPERS, C.N. (ed.) Environmental geochemistry of sulfide oxidation, developed from a symposium at 204th national meeting of the American Chemical Society, Washington DC, August 23-28, 1992, ACS symposium series, 550, 31-44.
- BOY, S. & HÄFNER, F. (2000) Parameterbestimmung für die Kippe Espenhain aus 10-jähriger Messung – Möglichkeiten und Grenzen mathematischer Verfahren.- Freiburger Forschungshefte, C482, 72-85.
- BRAUSE, H., RASCHER, J., SEIFERT, A. (1989) Transgressionsgeschichte und Kohlenqualität im Miozän der Lausitz.- Geoprofil, 1, 18-30.
- BRÜCKNER, H. (1928) Brennstoff-Chemie, 9, 402.
- BRÜSCHKE, A., PLESSOW, A., KITTSTEINER, M. & HEINRICHS, H. (1999) Herkunft und Lösungsverhalten von Spurenelementen in Sicker- und Porenwässern im Tagebaubereich Zwenkau/Cospuden.- UFZ-Bericht, ISSN 0948-9452, 25, 107-116.
- BTU (1999) Wissenschaftlich-technisches Projekt: Gewässergüte in Tagebauseen der Lausitz – Ostsachsen/Brandenburg. Gutachtenaktualisierung zur Entwicklung der Wasserbeschaffenheit im Bischdorfer und Kahnsdorfer See. Brandenburgische Technische Universität Cottbus (LS Hydrologie und Wasserwirtschaft, LS Gewässerschutz), Ingenieurbüro für Wasser und Boden GmbH Possendorf. Auftraggeber: LMBV GmbH. Cottbus, 30.06.1999.
- BTU (1998) Wissenschaftlich-technisches Projekt: Erfassung und Vorhersage der Gewässergüte in Tagebauseen der Lausitz als Basis für deren nachhaltige Steuerung und Nutzung. Gutachten zur Entwicklung der Wasserbeschaffenheit im Ilse-See. Brandenburgische Technische Universität Cottbus (LS Hydrologie und Wasserwirtschaft, LS Gewässerschutz), Ingenieurbüro für Wasser und Boden GmbH Possendorf, Ingenieurbüro für Grundwasser Cossebaude. Auftraggeber: LMBV GmbH. Senftenberg/Cottbus, 15.10.1998.
- BTU (1997) Wissenschaftlich-technisches Projekt: Erfassung und Vorhersage der Gewässergüte in Tagebauseen der Lausitz als Basis für deren nachhaltige Steuerung und Nutzung. Gutachten zur Entwicklung der
-

- Wasserbeschaffenheit im Bischdorfer See (RL 23). Brandenburgische Technische Universität Cottbus (LS Hydrologie und Wasserwirtschaft, LS Gewässerschutz, LS Wassertechnik), Ingenieurbüro für Wasser und Boden GmbH Possendorf, Ingenieurbüro für Grundwasser Cossebaude. Auftraggeber: LMBV GmbH. Senftenberg/Cottbus, 15.12.1997.
- BUCZKO, U. (1999) Modellierung des Wasserflusses und Stofftransports in der ungesättigten Zone heterogener Abraumkippen des Braunkohletagebaues im Lausitzer Revier.- Diss. BTU Cottbus, Cottbuser Schriften zu Bodenschutz und Rekultivierung, 6, 1-200.
- BUSCH, K.F., LUCKNER, L., THIEMER, K. (1993) Lehrbuch der Hydrogeologie, Bd. 3: Geohydraulik.- Gebrüder Borntraeger, Berlin Stuttgart.
- CARSTENSEN, A. & POHL, W. (2000) Long-term stability of overburden dump slopes in recultivated lignite mines of central germany – prediction of maximum pore water pressures.- Landslides in research, theory and practice, 221-226.
- CARR, M.H. & TUREKIAN, K.K. (1961) The geochemistry of cobalt.- *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 23, 9-60.
- CASAGRANDE, D.J., SIEFERT, K., BERSCHINSKI, C. & SUTTON, N. (1977) Sulfur in peat-forming systems of the Okefenokee Swamp and Florida Everglades: origins of sulfur in coal.- *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 41, 161-167.
- CEPEK, A.G. (1995) Gliederungsgrundsätze des Quartär.- In: SCHROEDER, J.H. & NOWEL, W. (Hrsg.) Führer zur Geologie von Berlin und Brandenburg, Nr. 3: Lübbenau – Calau.- Geowissenschaftler in Berlin und Brandenburg e.V., Selbstverlag, 36-38.
- CESNOVAR, R. & PENTINGHAUS, H. (1998) Mineralogische Signaturen des Abraums in Cospuden: Folgen der Flutung des Tagebaurestlochs.- In: Kommission Technische Mineralogie der Deutschen Mineralogischen Gesellschaft (Hrsg.) Tagungsband zur Tagung der KMT vom 14.-16. Juni 1998 in Halle/Saale, 1S.
- CORNELIUS, M. (1994) Sedimentpetrographische und geochemische Untersuchungen saalezeitlicher Moränen in Hamburg-Tinsdal.- *Mitteilungen aus dem Geol. Pal. Inst. Universität Hamburg*, 57, 33-56.
- DARBINJAN, F. (1989) Geochemie der Braunkohlen des Lausitzer Kohlenreviers.- *Geoprofil*, 1, 30-43.
- DARBINJAN, F., PÄLCHEN, W., LANGE, H. (1987) Zur Geochemie von Braunkohlen.- *Freiberger Forschungshefte*, C425, 107-123.
- DEBRIV, Deutscher Braunkohle- und Industrieverein e.V. (2001) Jahresbericht 2000.
- DEGENS, E. (1968) Geochemie der Sedimente.- Enke, Stuttgart.
- DOHRMANN, H. (1999) Untersuchungen zu hydraulischen und hydrochemischen Prozessen im Initialstadium bindiger Mischbodenkippen des Mitteldeutschen Braunkohlenreviers, Beispiel Flurkippe Cospuden/Zwenkau.- Diss. Universität Leipzig, 1-132.
- DORSCHNER, E. (19) Der Setzungsvorgang auf Tagebaukippen des Braunkohlenbergbaus.-
- ECKHARDT, G. (1995) Wasserhaushalt und Braunkohleförderung in der Lausitz.- In: SCHROEDER, J. H. & NOWEL, W. (Hrsg.) Führer zur Geologie von Berlin und Brandenburg, Nr. 3: Lübbenau – Calau.- Geowissenschaftler in Berlin und Brandenburg e.V., Selbstverlag, 232-236.
- EHLERS, J. (1994) Allgemeine und historische Quartärgeologie, Enke, Stuttgart 1-358.
- EISSMANN, L. & MÜLLER, A. (1979) Leitlinien der Quartärentwicklung im Norddeutschen Tiefland.- *Zeitschrift für Geologische Wissenschaften*, 7, 451-462.
- ENTENMANN, W. (1992) Das hydrogeologische Beweissicherungsverfahren für Hausmülldeponien, Teil 1, Verfahren, Fallbeispiele, Erkundung und Erfassung hydraulischer Daten.- *Clausthaler Geologische Abhandlungen*, 49, 1-164.
- EVANGELOU, V.P. (1995) Pyrite Oxidation and its Control.- CRC Press, Boca Raton, 1-293.
- FELDMANN, H. & MERKEL, B. (2000) Geochemische Charakterisierung der Kippe des ehemaligen Braunkohletagebaus Espenhain.- *Freiberger Forschungshefte*, C482, 61-70.
- FINKELMAN, R.B. (1981) Modes of occurrence of trace elements in coal.- U.S. Geological Survey Open-File Report, No. OFR-81-99, also PhD. Thesis, University of Maryland, 1980, 1-301.
- FISCHER, M. & KAUBISCH, M. (1992) Auswirkungen von Grundwasserabsenkung und Grundwasserwiederanstieg in Tagebaugebieten auf die Umwelt.- *Neue Bergbautechnik*, 22, 161-165.
- FISCHER, R., REISSIG, H., GOCKEL, G., SEIDEL, K.H. & GUDERITZ, T. (1998c) Untersuchungen zu verschiedenen Varianten der Renaturierung des stark sauren und eisenhaltigen Tagebaurestsees Heide VI.- Braunkohle - Surface mining, 50, 585-589.
-

- FISCHER, R., REISSIG, H., GOCKEL, G., SEIDEL, K.H. & GUDERITZ, T. (1998b) Morphometrische, chemische und biologische Untersuchungen sowie Prognose der Güteentwicklung im Bergbaurestsee Heide VI.- Braunkohle - Surface Mining, 50, 59-65.
- FISCHER, R., REISSIG, H., GOCKEL, G., SEIDEL, K.H., GUDERITZ, T. (1998a) Direkte Neutralisation und Untergrundwasserbehandlung des Restwassers im Tagebaurestsee Heide VI.- Braunkohle - Surface mining, 50, 273-278.
- FÖRSTER, W., TSCHESCHLOK, H., KAMEL, A. (1991) Beitrag zur Ermittlung bodenphysikalischer Parameter von verspülten Materialien.- Neue Bergbautechnik, 21, 172-177.
- FÖRSTER, W., WALDE, M., SCHWARZ, H. (1989) Setzungsfließbrutungen an einem Kippenböschungssystem.- Freiburger Forschungshefte, A791, 1-39.
- FREYTAG, K. & FEHLAUER, M. (2000) Grundwassermonitoring im Sanierungsbergbau – Erfordernis – Umfang – Zweck.- Freiburger Forschungshefte, C482, 207-218.
- FREYTAG, K. & MICHAEL, K. (1994) Standsicherheitsuntersuchungen von Böschungen im Brandenburger Braunkohlerevier.- Braunkohle Bergbautechnik, 46, 34-37.
- FRICKE, S. & SCHÖN, J. (1999) Praktische Bohrlochgeophysik.- Enke im Thieme-Verlag, Stuttgart, 1-254.
- FUCHS, K. & SCHÜLER, S. (1997) Geologische und morphogenetische Untersuchungen an Luftbildern und kippentechnologischen Unterlagen vom Innenkippenbereich des Senftenberger Sees (Insel) für den Zeitraum des Grundwasseranstiegs bis zur Gegenwart.- Dipl.-Arbeit BTU Cottbus, unveröffentlicht, 1-161, Anlagenband.
- FÜCHTBAUER, H. (Hrsg.) (1988), Sedimente und Sedimentgesteine.- Sediment-Petrologie Teil II, Schweizerbart, Stuttgart, 1-1141.
- GAST, M. & KATZUR, J. (1996) Strukturtypen der Bodendecken auf den Abschlußkippen und ihre Auswirkungen auf die Beschaffenheit des Kippengrundwassers im Bereich der Schlabendorfer und Seeser Felder.- In: GBL-Gemeinschaftsvorhabens Grundwassergüteentwicklung in den Braunkohlegebieten der neuen Länder, Heft 3, Schweizerbart, Stuttgart, 107-115.
- GATZWEILER, C. (1994) Sanierung und Rekultivierung im Lausitzer Braunkohlenrevier: ökologische Ziele und wirtschaftliche Chancen.- Tagung der Friedrich-Ebert-Stiftung am 31.5.1994 in Ruhland; Forschungsinstitut der Friedrich-Ebert-Stiftung in Bonn, Reihe „Wirtschaftspolitische Diskurse“, ISBN 3-86077-312-7, 60, 1-37.
- GEHRISCH, M., KADEN, P. & KUNTZE, W. (1989) In-situ-Untersuchungen und Laboruntersuchungen zur Ermittlung der Porosität und der Rohwichte in Kippen aus nichtbindigem Lockergestein, Teil I.- Neue Bergbautechnik, 19, 96-99.
- GEIPEL, V. & ZIMMERMANN, P. (1984) Erfahrungen aus der Baggerung in Altbergbaugebieten im Großtagebau Meuro.- In: IV. Bodenmechanisches Kolloquium, Cottbus, November 1984, Vortragsband, 79-86.
- GENIESER, K. (1955) Ehemalige Elbeläufe in der Lausitz.- Geologie, Bd. 4, 223-279.
- GLÄSSER, W. & CHRISTOPH, G. (2000) Neue Betrachtungen zum Grundwasserwiederanstieg in Braunkohlentagebaukippen.- Freiburger Forschungshefte, C482, 195.
- GLUSKOTER, H.J. & SIMON, J.A. (1968) Sulfur in Illinois coals.- Ill. State Geol. Surv. Circ., 432.
- GMELIN, Handbuch der anorganischen Chemie (1969) Schwefel – Vorkommen, Technologie des Schwefels und seiner Verbindungen.- 8. Aufl., Verlag Chemie, Weinheim/Bergstraße, 1-510.
- GMELIN, Handbuch der anorganischen Chemie (1974) Titan.- 8. Aufl., Verlag Chemie, Weinheim/Bergstraße, 1-481.
- GOCKEL, G. (2000) Derzeitiger Stand und Planung für die langfristige Sicherung der Wasserbeschaffenheit in den entstehenden Tagebaurestseen.- Freiburger Forschungshefte, C482, 43-45.
- GOCKEL, G. & SEIDEL, K.H. (1999) Überwachung der Grund- und Oberflächengewässer der Lausitz als Basis der Steuerung der Restlochflutung und Restlochseenachsorge.- Proceedings des Dresdner Grundwasser Grundwasserforschungszentrums e.V., „Grundwasser-Monitoring“, 97-106.
- GROSSWIG, S., HURTIG, E., KÜHN, K. (1996) Fibre optic temperature sensing: A new tool for temperature measurements in boreholes.- Geophysics, 61, 1065-1067.
- GRUNERT, T., PLÖTZE, M., WOLF, D. (1998) Eisendisulfid in Kippen des Lausitzer Braunkohlereviere, mineralogische Implikationen zur Untersuchung von Versauerungsprozessen.- Proceedings des Dresdner Grundwasserforschungszentrums e.V., ISSN 1430-0176, Heft 13, 271-279.
- GRUSCHKA, G. (1992) Überlegungen zur Systematik der Tagebaubegriffe.- Neue Bergbautechnik, 22, 255-260.
-

- GRÜTZMACHER, G. (1999) Untersuchungen zur Grundwassergüteentwicklung in der Bergbaufolgelandschaft am Beispiel der Braunkohletagebaue Goitsche und Gröbern.- Diss. FU Berlin, 1-110.
- HALLBAUER, C. (1981) Geotechnische Grundlagen für die Errichtung von Eisenbahnstrecken auf Tagebaukippen des Braunkohlenbergbaues unter besonderer Berücksichtigung des Eigensetzungsverhaltens.- Diss. Hochschule für Verkehrswesen Dresden, 1-147.
- HATZSCH, P. (1994) Bohrlochmessungen.- Enke, Stuttgart, 1-145.
- HAUSDORF, W. (1997) Geotechnische Probleme beim Bauen auf Tagebaukippen des Mitteldeutschen Braunkohlebergbaus.- Glückauf, 133, 272.
- HEIMBOLD, J., LANGE, J., BOY, W. (1968) Ein Beitrag zur Hydrologie der Mischbodenkippen mit Schlußfolgerungen für die Entwässerung und die Standsicherheit der Kippen.- Bergbautechnik, 18, 454-459.
- HEINRICHS, H. & HERRMANN, A.G. (1990) Praktikum der Analytischen Geochemie.- Springer, Berlin.
- HELMS, W. (1999) Umweltverträglichkeitsprüfung für Tagebauprojekte in Deutschland und in den USA.- Braunkohle - Surface Mining, 51, 171-178.
- HOFMANN, F. (1959) Einflüsse der granulometrischen und mineralogischen Zusammensetzung von Gießereisanden auf das betriebliche Verhalten.- Giesserei, 46, 1-6.
- HOLLEMANN, A. & WIBERG, E. (1995) Lehrbuch der Anorganischen Chemie.- 101. Aufl., Walter de Gruyter, New York, 1-2033.
- HOLMSTRÖM, H., Ljungberg, J., Öhlander, B. (1999) Role of carbonates in mitigation of metal release from mining waste. Evidence from humidity cells tests.- Environmental Geology, 37, 267-280.
- HOTH, N. (2000) Reduktive und Pufferungsprozesse in Braunkohleabraumkippen – ein wirksamer Selbsthilfemechanismus?- Freiburger Forschungshefte, C482, 114-127.
- HÜLMEYER, S. (2002) Abschätzung der Sickerwasserbelastung der Braunkohlentagebauabraumkippe Cospuden (Mitteldeutschland).- Münchener Geologische Hefte, B15, 1-119.
- HÜTTL, R.F. (1996) BTUC Innovationskolleg - Ökologisches Entwicklungspotential der Bergbaufolgelandschaften im Lausitzer Braunkohlerevier.- Sprecherbericht 1994-1996.
- JACOB, H. (1958) Dopplerit. Seine Petrographie und Genesis.- Geologie, 1, 61-79.
- JORDAN, H. & Weder, H.-J. (Hrsg.) (1995) Hydrogeologie - Grundlagen und Methoden, Regionale Hydrogeologie: Mecklenburg-Vorpommern, Brandenburg und Berlin, Sachsen-Anhalt, Sachsen, Thüringen.- 2. Aufl., Enke, Stuttgart, 1-603.
- KARGE, W. (2001) Bergbauliche Sanierung in der Lausitz.- „Montangeschichte“, herausgegeben vom Nordhessischen Braunkohlenbergbaumuseum Borken, 131-146.
- KAUBISCH, M. (1986) Zur indirekten Ermittlung hydrogeologischer Kennwerte von Kippenkomplexen, dargestellt am Beispiel des Braunkohlebergbaus.- Diss. Bergakademie Freiberg/Sachsen, 1-129.
- KAUBISCH, M. & FISCHER, M. (1985) Zur Berechnung des Filtrationskoeffizienten in Tagebaukippen, Teil III: Ermittlung des Filtrationskoeffizienten für schluffige Feinsande aus Mischbodenkippen durch Korngrößenanalysen.- Neue Bergbautechnik, 15, 142-143.
- KAUBISCH, M. & FISCHER, M. (1984b) Zur Berechnung des Filtrationskoeffizienten in Kippen, Teil II: Ermittlung des Filtrationskoeffizienten aus Durchströmungsversuchen für schluffige Feinsande aus Mischbodenkippen.- Neue Bergbautechnik, 14, 424.
- KAUBISCH, M. & FISCHER, M. (1984a) Zur Berechnung des Filtrationskoeffizienten in Tagebaukippen, Teil I: Die Ermittlung des Filtrationskoeffizienten aus Korngrößenanalysen in rolligen Kippen.- Neue Bergbautechnik, 14, 340.
- KAUTZ, K., PICKHARDT, W., RIEPE, W., SCHAAF, R., SCHOLZ, A., ZIMMERMEYER, G. (1984) Spurenelemente in der Steinkohle, ihre Verteilung bei der Verbrennung und ihre biologische Wirkung.- Glückauf-Hefte, 45, 228-237.
- KERTH, M. & WIGGERING, H. (1991) Steinkohlenbergehalden als anthropogene geologische Körper.- In: WIGGERING & KERTH (Hrsg.) Bergehalden des Steinkohlenbergbaus-Beanspruchung und Veränderung eines industriellen Ballungsraumes, Vieweg, Braunschweig, 47-58.
- KEZDI, A. (1964) Bodenmechanik, Bd. 1+2.-, VEB Verlag für Bauwesen, Berlin.
- KINZE, M. (1997) Zur Sanierung des Wasserhaushalts der Lausitz.- Glückauf, 133, 262-267.
- KLAPPER, H. & SCHULTZE, M. (1998) Limnologie und Nachnutzung von Tagebauseen.- In: PFLUG, W. (Hrsg.) Braunkohlentagebau und Rekultivierung – Landschaftsökologie, Folgenutzung, Naturschutz.- Springer, Berlin, 926-938.
- KLOSS (mdl. Mittlg. 1999) Lausitzer Braunkohle AG (LAUBAG), Senftenberg.
-

- KLUGE, C. (1980) Abflachen der Böschungen durch Spülen.- Diss. Bergakademie Freiberg/Sachsen.
- KLUGE, C. (1977) Das Abflachen von Böschungen des Braunkohlenbergbaues durch Spülen.- Technik und Umweltschutz, 18, 73-82.
- KNÖLLER, K. (1999) Anwendung stabiler Umweltisotope zur Bewertung hydrochemischer Zustände und Prozesse in Folgelandschaften des Braunkohlebergbaus.- Diss. Universität Leipzig, 1-153.
- KÖLLING, M. (1990) Modellierung geochemischer Prozesse im Sickerwasser und Grundwasser.- Berichte aus dem Fachbereich Geowissenschaften der Universität Bremen, 8, 1-135.
- KUPETZ, M., SCHUBERT, G., SEIFERT, A., WOLF, L. (1989) Quartärbasis, pleistozäne Rinnen und Beispiele glazitektonischer Lagerungsstörungen im Niederlausitzer Braunkohlengebiet.- Geoprofil, 1, 2-17.
- LANGE, H. (1974) Gutachten Ingenieurgeophysik Tagebaukippe Seese.- VEB Geophysik Leipzig, 1-44.
- LASCH, G. (1978) Zu einigen Aspekten der Genese Lausitzer Kaoline.- Schriftenreihe geologische Wissenschaften, 11, 165-178.
- LAUBE, H. & WARMBOLD, U. (1984) Abweichungen vom Regelaufbau der F 60-Kippe und die damit verbundenen Auswirkungen auf den Sicherheitskoeffizienten.- In: IV. Bodenmechanisches Kolloquium, Cottbus, November 1984, Vortragsband, 51-58.
- LEIBIGER, H. (1964) über Gesetzmäßigkeiten der Bodenentmischung beim Verkippen von Mischböden in Braunkohlentagebauen.- Freiburger Forschungshefte, A309, 1-102.
- LEUCHS, W. (1988) Vorkommen, Abfolge und Auswirkungen anoxischer Redoxreaktionen in einem pleistozänen Porengrundwasserleiter.- Besondere Mitteilungen zum Deutschen Gewässerkundlichen Jahrbuch, 52, 1-106.
- LEUTWEIN, F. & RÖSLER, H.J. (1956) Geochemische Untersuchungen an paläozoischen Kohlen Mittel- und Ostdeutschlands.- Freiburger Forschungshefte, C19, 1-196.
- LIEDTKE, H. (1981) Die nordischen Vereisungen in Mitteleuropa.- Forsch. dtsh. Landeskd., Trier, 204, 1-307.
- LINDNER, H., BRIEDEN, H.J. & DIERICH, D. (1982) Nachweis von Dichtehomogenitäten in einer Braunkohlenkippe mittels gravimetrischer, radiometrischer und geomechanischer Untersuchungen.- Neue Bergbautechnik, 12, 497-502.
- LISSNER, A. & SCHÄFER, H.-G. (1956) Die Chemie der Braunkohle – Bd. I: Wissenschaftlicher Teil.- 3. Aufl., VEB Wilhelm Knapp Verlag, Halle (Saale), 1-304.
- LORKE, R. (2000) Geotechnische Bewertung der Sanierungsarbeiten.- In: LMBV-Abschlußbetriebsplan Tagebau Meuro.
- LUCKNER, L., BÖRNER, F., ABEL, A., SCHREYER, J., JENK, U., ZIMMERMANN, U., NINDEL, K., METSCHIES, T. (1998) Sanierung der Uranerzgrube Königstein – Flutungsexperiment, Durchführung und Auswertung.- Grundwasserforschungsinstitut GmbH, Dresden / Wismut GmbH, Chemnitz/Königstein.
- LUCKNER, L. (1997) Bedeutung der schnellen Fremdwasserflutung für die Wiedernutzbarmachung der vom Braunkohlentagebau beanspruchten Flächen.- Glückauf, 133, 273-278.
- MARSHALL, C.P. & FAIRBRIDGE, R.W. (1999) Encyclopedia of Geochemistry.- Kluwer, Dordrecht, 1-712.
- MASON, B. & MOORE, C.B. (1985) Grundzüge der Geochemie.- Enke, Stuttgart, 1-340.
- MATSCHAK, H. (1969d) Beiträge zur Strukturforschung an Tagebaukippen, Teil IV: Kennwertänderungen gleichförmiger Sande bei der Abraum-Verkipfung.- Bergbautechnik, 19, 632-637.
- MATSCHAK, H. (1969c) Beiträge zur Strukturforschung an Tagebaukippen, Teil III: Radiometrische und seismische Ermittlung unterschiedlicher Struktur- und Stabilitätsbedingungen.- Bergbautechnik, 19, 509-515.
- MATSCHAK, H. (1969b) Beiträge zur Strukturforschung an Tagebaukippen, Teil II: Bodenkennwerte und ihre Beziehungen in nichtbindigen Kippenböschungen.- Bergbautechnik, 19, 397-402.
- MATSCHAK, H. (1969a) Beiträge zur Strukturforschung an Tagebaukippen, Teil I: Rohdichte-Verteilung in Abhängigkeit von der Fallhöhe und anderen Faktoren.- Bergbautechnik, 19, 287-293.
- MATTHES, S. (1996) Mineralogie, 5. Aufl., Springer, Berlin, 1-499.
- MATTHESS, G. (1988a) Veränderungen der Sicker- und Grundwasserbeschaffenheit durch saure oder säurebildende Schwefel- und Stickstoff-Deposition.- Meyniana, 40, 1-20.
- MEINERT, N. & STORZ, W. (2000) Ableitung kippenspezifischer Stoffparameter aus flächenhaften geophysikalischen Erkundungen.- Freiburger Forschungshefte, C482, 71.
- MEINERT, N. et al. (1986) Grundwasservorratsprognosen Bezirk Cottbus.- VEB Hydrogeologie, Nordhausen, 24.11.1986.
- MEINHARDT, C. (1997) Landschaften nach dem Tagebau – Berichte aus der ökologischen Forschung.- BMBF (Hrsg.), Bonn, 1-64.
-

- MEINHOLD, R. (1965) Geophysikalische Meßverfahren in Bohrungen.- Geest & Portig, Leipzig, 1-237.
- MERKEL, B. & SPERLING, B. (1998) Hydrogeochemische Stoffsysteme, Teil II, DVWK Schriften, 117, 1-397.
- MERKEL, B. & SPERLING, B. (1996) Hydrogeochemische Stoffsysteme, Teil I, DVWK Schriften, 110, 1-288.
- MILDE, G. (1970/71) Hydrogeologie des tieferen Tertiärs in der Niederlausitz (Text 1970, Karten 1971).- Freiburger Forschungshefte, C257, 1-68, 10 Karten.
- MILDE, G. (1966) Die Hydrogeologie des östlichen Baruther Urstromtals.- Freiburger Forschungshefte, A391, 1-133.
- MILDE, G. (1961) Hydrogeologische Untersuchungen im Raum künftiger Braunkohlentagebaue der östlichen Mark Brandenburg und der Lausitz.- Freiburger Forschungshefte, C96, 1-270.
- MÜLLER, G. & GASTNER, M. (1971) The "Karbonat-Bombe", a simple device for the determination of the carbonate content in sediments, soils, and other minerals.- Neues Jahrbuch für Mineralogie, Abhandlungen, 10, 466-469.
- NITZSCHE, H.-M., GLÄSSER, W.; HARTING, P. (2000) Chemical and isotopic composition of the ground air and the substrate of a lignite mining dump.- Isotopes Environmental Health Studies, 36, 286-387.
- NOWEL, W. (1995) Geologische Übersichtskarte des Niederlausitzer Braunkohlenreviers – 1 : 200 000.- LAUBAG, Senftenberg.
- NOWEL, W. (1995) Beiträge In: SCHROEDER, J.H. & NOWEL, W. (Hrsg.) Führer zur Geologie von Berlin und Brandenburg, Nr. 3: Lübbenau – Calau.- Geowissenschaftler in Berlin und Brandenburg e.V., Selbstverlag, 1-283.
- NOWEL, W., BÖNISCH, R., SCHNEIDER, W., SCHULZE, H. (1994) Geologie des Lausitzer Braunkohlenreviers.- Festschrift der LAUBAG zum 500. Geburtstag von Georg Agricola, 1-102.
- NOWEL, W. & HELLWIG, D. (1995) Das Pleistozän im Tagebaufeld Seese-Ost.- In: SCHROEDER, J.H. & NOWEL, W. (Hrsg.) Führer zur Geologie von Berlin und Brandenburg, Nr. 3: Lübbenau – Calau.- Geowissenschaftler in Berlin und Brandenburg e.V., Selbstverlag, 80-87.
- OBERMANN (1991) Auswirkungen von Braunkohlenabraumkippen auf die Grundwasserbeschaffenheit.- Zweites Untersuchungsprogramm Braunkohle der Landesregierung NRW; Abbauvorhaben Garzweiler II; Dokumentation der Ergebnisse, MURL NRW, Düsseldorf, 259-280.
- OBERMANN, P. & WISOTZKY, F. (1998) Auswirkungen der Pyritoxidation im Bereich des Braunkohlentagebaus Garzweiler auf die Qualität des Kippengrundwassers - Möglichkeiten und Maßnahmen der Qualitätsverbesserung.- Deutsche Gewässerkundliche Mitteilungen, 42, 234-240.
- OEHMIG, R., VOIGT, G. & VOIGT, H.J. (2000) Geologische Erkundung der Kippen des Niederlausitzer Braunkohlereviers: Mineralogisch-petrographische Zusammensetzung, Gefügebau und Lagerung der Abraumschüttung aus tertiären und quartären Sedimenten.- In: HÜTTL, R.F., KLEM, D., WEBER, E. (Hrsg.) Ökologisches Entwicklungspotential der Bergbaufolgelandschaften im Niederlausitzer Braunkohlerevier, Teubner, Stuttgart, 289-304.
- OEHMIG, R. (1988) Petrographie und Log-Daten einer klastischen Rotliegend/Buntsandstein-Folge.- Heidelberger Geowissenschaftliche Abhandlungen, 14, 1-219.
- PAHL, M.H., ERNST, R., WILMS, H. (1993) Lagern, Fördern und Dosieren von Schüttgütern.- 2. Aufl., Verlag TÜV Rheinland, 1-261.
- PEKDEGER, A. & SCHULZ, H.D. (1975) Ein Methodenvergleich des kf-Wertes von Sanden.- Meyniana, 27, 35- 40.
- PENTINGHAUS, H. (1998) Die Folgen der Flutung der Restlöcher des Braunkohlentagebaus in Mitteldeutschland.- In: Kommission Technische Mineralogie der Deutschen Mineralogischen Gesellschaft (Hrsg.): Tagungsband zur Tagung der KMT vom 14.-16. Juni 1998 in Halle/Saale, 1S..
- PETTIJOHN, F.J. & POTTER, P.E., SIEVER, R. (1973) Sand and sandstone.- Springer, New York, 1-618.
- PETZOLD, H. (mdl. Mittlg. 2000) Lausitzer Braunkohle AG (LAUBAG), Senftenberg.
- PFLUG, W. (Hrsg.) (1998) Braunkohlentagebau und Rekultivierung – Landschaftsökologie, Folgenutzung, Naturschutz.- Springer, Berlin, 1-1068.
- PLESSOW, A. & HEINRICHS, H. (2000) Einfluß der Pyritoxidation auf das Lösungsverhalten von Spurenelementen in Poren-, Sicker- und Grundwässern einer Abraumhalde (Zwenkau/Sachsen).- In: Bergbau und Umwelt – Langfristige geochemische Einflüsse.- Geowissenschaften und Umwelt, Bd. 6, WIPPERMANN, T. (Hrsg.), Springer, Berlin, 41-55.
- PLESSOW, A., BIELERT, U., HEINRICHS, H., STEINER, I. (1997) In: MATSCHULLAT, J., TOBSCHALL, H.J., VOIGT, H.-J. (Hrsg.) Geochemie und Umwelt.- Springer, Berlin, 395-408.
-

- PREIN, A. (1993) Sauerstoffzufuhr als limitierender Faktor für die Pyritverwitterung in Abraumkippen von Braunkohletagebauen.- Mitteilungen des Instituts für Wasserwirtschaft, Hydrologie und landwirtschaftlichen Wasserbau, Universität Hannover, 79, gleichzeitig Diss. Universität Hannover, 1-126.
- PREIN, A. & MULL, R. (1995) Pyritverwitterung in Abraumkippen des Braunkohletagebaus - limitierende Einflüsse und resultierende Grundwasserkontamination.- Zeitschrift der Deutschen Geologischen Gesellschaft, 146, 146-151.
- PRINZ, H. (1997) Abriß der Ingenieurgeologie.- 3. Aufl., Enke, Stuttgart, 1-546.
- RAMDOHR, P. & STRUNZ, H. (1978) Klockmanns Lehrbuch der Mineralogie.- 16. Aufl., 1-876.
- RAMDOHR, P. (1975) Die Erzminerale und ihre Verwachsungen.- 4. Aufl., Akademie-Verlag, Berlin, 1-1277.
- RASEMANN, W. (Hrsg.) (2001) Qualitätssicherung von Stoffsystemen im Abfall- und Umweltbereich - Probenahme und Datenanalyse.- IQS-Institut für Qualitätssicherung von Stoffsystemen Freiberg e.V.- Informationsblatt, 13, 4-8.
- RASEMANN, W., PREUSSE, C. & MÜLLER, A. (1998) Zum Einfluß der Probenahmebedingungen auf die Reproduzierbarkeit der Bewertung von stückigen und körnigen Mischgütern. Aufbereitungs-Technik, 39, 607-617.
- RAUSCHER, K.; VOIGT, J.; WILKE, J.; WILKE, K.-TH. (1986) Chemische Tabellen und Rechentafeln für die analytische Praxis.- 8. Aufl., VEB Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie Leipzig, 1-320.
- REICHEL, F. & UHLMANN, W. (1995) Wasserbeschaffenheit in Tagebaurestseen, Studien und Tagungsberichte, Band 6, Landesumweltamt Brandenburg, 1-86.
- REICHEL, F., GUTT, B., KANNEGIESER, B. & WITTIG, H. (1992) Gestaltung der Bergbaufolgelandschaft in Abhängigkeit von der Prognose der großräumigen Grundwasserdynamik.- Neue Bergbautechnik, 22, 155- 160.
- REICHEL, F., GUTT, B. & KAUBISCH, M. (1989) Rechnergestützte Modellierung des Grundwasseranstiegs in einer Förderbrückenkippe des Braunkohlenbergbaus.- Neue Bergbautechnik, 19, 103-109.
- REICHEL, G. (1999) Ein mathematisches Modell zum Primärsetzungsverhalten kohäsionsloser Lockergesteine.- Braunkohle – Surface mining, 51, 671-677.
- REICHEL, G. (1997) Zum Einfluß der Anstiegsgeschwindigkeit aufgehenden Grundwassers in Kippen auf das relative volumenbezogene Sackungsmaß.- Braunkohle - Surface Mining, 49, 49-55.
- REINHÄCKEL, G., SCHRADER, D., KRÜGER, G., STROBL, P., MÜLLER, A., VOLK, P., WIEGAND, U., GLÄSSER, W. & KAUFMANN, H. (2000) Analyse des Thermalverhaltens und der stofflichen Zusammensetzung der Förderbrückenkippe Zwenkau mit Fernerkundungsdaten.- Braunkohle - Surface Mining, 52, 63-70.
- ROLLAND, W., JANNACK, K., GRÜNEWALD, U. (2000) Standortbezogene Erfassung und Modellierung von Wasser- und Stoffflüssen in Kippen der Lausitzer Braunkohletagebaue unter Nutzung der Versuchsanlage auf der Innenkippe des Restsees Gräbendorf.- In: HÜTTL, R.F., KLEM, D., WEBER, E. (Hrsg.) Ökologisches Entwicklungspotential der Bergbaufolgelandschaften im Niederlausitzer Braunkohlerevier, Teubner, Stuttgart, 275-288.
- ROLLAND, W., CHMIELEWSKI, R., WAGNER, H. & GRÜNEWALD, U. (1998b) Ergebnisse von Felduntersuchungen zur Verwitterungskinetik am Beispiel eines aktiven Tagebaus der Lausitz.- In: GBL-Gemeinschaftsvorhaben Grundwassergüteentwicklung in den Braunkohlengebieten der neuen Länder, 4. Kolloquium: Ergebnisse und Empfehlungen, Heft 5, Schweizerbart, Stuttgart, 48-56.
- ROLLAND, W., CHMIELEWSKI, R., WAGNER, H. & GRÜNEWALD, U. (1998a) Bilanzierung der Säureproduktion und Pufferkapazität in der Kippe des Tagebaus Jänschwalde.- Wissenschaftsmagazin Forum der Forschung, 7, 121-126.
- RÖSLER, H.J. (1991) Die anorganischen Komponenten der Kohlen.- Sitzungsberichte der sächsischen Akademie der Wissenschaften zu Leipzig (Mathematisch-naturwissenschaftliche Klasse), 122, 1-47.
- RÖSLER, H.J. & STARKE, R. (1986) Bedeutung der Tonminerale in den Braunkohle-Begleitschichten.- Zeitschrift für angewandte Geologie, 32, 225-231.
- RÖSLER, H.J. & STARKE, R. (1978) Tonmineralverteilung in tertiären Sedimenten der DDR in Abhängigkeit von der Fazies.- Zeitschrift für geologische Wissenschaften, 6, 759-766.
- RÖSLER, H.J., STRZODKA, K. & STARKE, R. (1978) Die Abhängigkeit bodenmechanischer Parameter in Braunkohletagebauen von der Zusammensetzung der Tone.- Neue Bergbautechnik, 8, 485-490.
- RÖSLER, H.J., BEUGE, P., SCHRÖN, W., HAHNE, K., BRÄUTIGAM, S. (1976) Die anorganischen Komponenten der Braunkohlen und ihre Bedeutung für die Braunkohlenerkundung.- Freiburger Forschungshefte, C331, 53-70.
-

- RÖSLER, H.J. & LANGE, H. (1975) Geochemische Tabellen.- 2. Aufl., VEB Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, Leipzig, 1-674.
- RUCH, R.R., GLUSKOTER, H.J., SHIMP, N.F. (1974) Occurrence and distribution of potentially volatile trace elements in coal.- Ill. Geol. Surv. Environ. Notes, 72, 1-95.
- RÜDE, T.R., VOGELSANG, A., PETRI, E., WOHNICH, S. (1998) Pyrite oxidation and water quality in a former open pit lignite mine.- In: WEAVER, T.R. & LAWRENCE, C.R. (ed.) Groundwater sustainable solutions.- Proceedings IAH Groundwater Conference, Melbourne 8.-13.3.1998, Brunswick, 557-562.
- RUMPEL, C. (1999) Differenzierung und Charakterisierung pedogener und geogener organischer Substanz in forstlich rekultivierten Kippböden.- Cottbuser Schriften zu Bodenschutz und Rekultivierung, 5, 1-125.
- SAMES, D., HOTH, N., KRINGEL, R. (2000) Modellierung der Grundwassergüteentwicklung südlich von Leipzig als Ergebnis des BMBF/LMBV-Verbundprojektes Kippe Espenhain.- Freiburger Forschungshefte, C482, 103-113.
- SCHACHTSCHABEL, P., BLUME, H.-P., HARTGE, K. H., SCHWERTMANN, U. (1976) Scheffer/Schachtschabel Lehrbuch der Bodenkunde.- 9. Aufl., Enke, Stuttgart, 1-394.
- SCHMITZ, A. & FRIEDRICH, S. (2000) Flächenhafter Nachweis der Verdichtung stabilisierter Kippen und Kippenböschungen als Voraussetzung für die Beendigung der Bergaufsicht.- Freiburger Forschungshefte, C483, 1 S.
- SCHOLZ, R.P. & KAUBISCH, M. (1986) Zur wasserhaushaltlichen Charakterisierung von Kippenkomplexen im Braunkohlenbergbau.- Neue Bergbautechnik, 16, 460-463.
- SCHÖN, J. (1983) Petrophysik – Petrophysikalische Eigenschaften von Gesteinen und Mineralen.- Enke, Stuttgart, 1-405.
- SCHÖNE, R. (1967) Beitrag zur Gründung von Bauwerken auf Kippengelände.- Wissenschaftliche Zeitschrift der Hochschule für Bauwesen Leipzig, H. 1/2, 61-65.
- SCHÖPKE, R., KOCH, R., STRIEMANN, A., PREUSS, V., REGEL, R. (2002) Experimentelle Bestimmung des maximalen Säurebildungs- bzw. Pufferungspotenzials von sulfidhaltigen Lockergesteinen.- Grundwasser, 2, 96-100.
- SCHÖPKE, R., KOCH, R., PIETSCH, W. (2000) Chemisch bedingte Beschaffenheitsveränderungen des Sicker- und Grundwassers.- In: Hüttl, R.F., Klem, D., Weber, E. (Hrsg.) Ökologisches Entwicklungspotential der Bergbaufolgelandschaften im Niederlausitzer Braunkohlerevier, Teubner, Stuttgart, 142-156.
- SCHRÖDER, R. (1992) Geochemische und statistische Untersuchungen zur Bindung und Verteilung der kohlenrelevanten Spurenelemente Arsen, Beryllium, Cadmium, Kobalt, Chrom, Kupfer, Quecksilber, Mangan, Molybdän, Nickel, Blei, Uran, Vanadium und Zink in Flözkohlen des Westfals des Ruhrgebiets.- Diss. RWTH Aachen, 1-151.
- SCHROEDER, J. H. & NOWEL, W. (Hrsg.) (1995) Führer zur Geologie von Berlin und Brandenburg, Nr. 3: Lübbenau – Calau.- Geowissenschaftler in Berlin und Brandenburg e.V., Selbstverlag, 1-283.
- SCHUBERT, K. (1972) Böschungen – Dämme, Halden, Kippen.- VEB Grundstoff, Leipzig, 1-273.
- SCHUHMACHER, P., MERZ, C., WINKLER, A. (2000) Migrationsverhalten umweltrelevanter Spurenstoffe unter wechselnden Milieubedingungen im oberflächennahen Grundwasserleiter des Oderbruchs.- HydroGeoEvent 2000 Wasser-Gesteins-Wechselwirkungen, 29.9.-4.10.2000, Heidelberg, Tagungsband, 66.
- SCHWEIGERT, S. (1999) Aufbau eines GIS-gestützten Modells zur Quantifizierung der Pyritoxidation auf der Kippenoberfläche des Tagebaus Jänschwalde.- Diplomarbeit BTU Cottbus, unveröffentlicht.
- SEIM, R. & TISCHENDORF, G. (1990) Grundlagen der Geochemie.- VEB Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, Leipzig, 1-632.
- STACH, H. & TEICHMÜLLER, M. (1953) Zur Chemie und Petrographie der Ionen-Austauscher aus Braun- und Steinkohlen, Teil I-III.- Brennstoff-Chemie, 34, 275-281, 333-336, 337-338.
- STACKEBRANDT, W. (Hrsg.) (1997) Atlas zur Geologie von Brandenburg im Maßstab 1 : 1 000 000.- Landesamt für Geowissenschaften und Rohstoffe Brandenburg, Kleinmachnow, 1-80.
- STEIN, U. (1984) Bewertung verschiedener Maßnahmen zur Stabilisierung von setzungsfließgefährdeten Kippen an Restlöchern.- In: IV. Bodenmechanisches Kolloquium, Cottbus, November 1984, Vortragsband, 39-50.
- STEINBRECHER, D. et al. (1982) Komplexinterpretation von Bohrlochmessungen – Braunkohlenerkundung.- Forschungsbericht V5/O, VEB Geophysik Leipzig.
- STIESS, M. (1994) Mechanische Verfahrenstechnik, Bd. 2.- Springer, Berlin, 1-407.
- STOCK, U. (1989) Beitrag zur Modellierung des Setzungsfließens.- Freiburger Forschungshefte, A791, 40-96.
-

- STRIEGLER, W. & GÖBEL, C. (1985) Bau von Verkehrswegen über Kippen des Braunkohle-Bergbaues.- Zeitschrift für angewandte Geologie, 31, 43-47.
- SUHR, P. (1995) Das Tertiär - Stratigraphie und Sedimentologie.- In: SCHROEDER, J. H. & NOWEL, W. (Hrsg.) Führer zur Geologie von Berlin und Brandenburg, Nr. 3: Lübbenau – Calau.- Geowissenschaftler in Berlin und Brandenburg e.V., Selbstverlag, 20-30.
- SUHR, P., SCHNEIDER, W., LANGE, J.-M. (1992) Facies relationships and depositional environments of the Lausitzer (Lusatic) Tertiary.- 13th IAS Regional Meeting on Sedimentology, Jena, Excursion Guide-Book, 229-260.
- SÜSS, M. (1964) Petrologische und technologische Untersuchungen am 2. und 4. Niederlausitzer Flözhorizont.- Freiburger Forschungshefte, C185, 1-132.
- SWAINE, D.J. (1990) Trace elements in coal.- Butterworths, London, 1-278.
- TISSOT, B. P. & WELTE, D. H. (1978) Petroleum Formation and Occurrence.- 2. Aufl., Springer, Berlin, 1-536.
- THIEMIG, F. (1998-4/2002) Lausitzer und Mitteldeutsche Bergbauverwaltungsgesellschaft (LMBV), Geotechnik, Länderbereich Brandenburg; mündliche Mitteilungen, unveröffentlichte Unterlagen.
- TUREKIAN, K. & WEDEPOHL, K. (1961) Distribution of the elements in some major units of the earth's crust.- Geol. Soc. Amer. Bull., 72, 175-192.
- TURSKI, W.-W. (1995) Ergebnisbericht bodenphysikalischer Untersuchungen „Laboruntersuchungen von gestörten und ungestörten pleistozänen kohäsionslosen Lockergesteinsproben im Rahmen der Kalibrierung der Drucksonde“, LAUBAG, Abt. Bodenmechanik, 31. März 1995, unveröffentlicht.
- VINKEN, R. (Hrsg.) (1988) The Northwest European Tertiary Basin.- Geologisches Jahrbuch, A100, 1-508.
- VINOGRADOV, A. P. (1962) Die Durchschnittsgehalte der chemischen Elemente in den Hauptarten der Eruptivgesteine (russ.).- Geochimija, 7.
- VOIGT, G. & OEHMIG, R. (1996) Geologische Erkundung der Kippen des Niederlausitzer Braunkohlereviere: Mineralogisch-petrographische Zusammensetzung, Gefügebau und Lagerung der Abraumschüttung aus tertiären und quartären Sedimenten.- Antrag Teilprojekt 21 im Innovationskolleg „Ökologisches Entwicklungspotential der Bergbaufolgelandschaften im Lausitzer Braunkohlerevier“ an der BTU Cottbus, Sprecher R.F. Hüttl.
- VOIGT, G. (5/1996-2002) Lehrstuhlgründer Umweltgeologie, BTU Cottbus; Unterlagen Vorlesung Postmontangeologie/Sanierungsbergbau Braunkohle 1993-1998; Lehrstuhlarbeitsberatungen (LSAB).
- VOIGT, H.-J. (1990) Hydrogeochemie.- Springer, Berlin, 1-310.
- VULPIUS, R. & NEUBERT, K.H. (1982) Zur Verteilung und Genese des Schwefels in den Braunkohlen des 2. Lausitzer Flözhorizontes.- Neue Bergbautechnik, 11, 653-658.
- WAGENBRETH, O. & STEINER, W. (1990) Geologische Streifzüge – Landschaft und Erdgeschichte zwischen Kap Arkona und Fichtelberg.- Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, Leipzig, 1-203.
- WALTER, R. (1995) Geologie von Mitteleuropa.- 6. Aufl., Enke, Stuttgart, 1-566.
- WEDEPOHL, K.H. (1970) Environmental influences on the chemical compositions of shales and clays.- Phys. Chem. Earth, 8, 305-333.
- WEDEPOHL, K.H. (1969) Handbook of Geochemistry Vol. I, Springer, Berlin, 1-442.
- WEDEPOHL, K.H. (1967) Geochemie.- In: Brinkmann, R. (Hrsg.) Lehrbuch der Allgemeinen Geologie, Bd. III.- Enke, Stuttgart, 548-606.
- WICHTER, L. & KÜGLER, M. (2000) Beobachtung von Setzungen und Sackungen locker gelagerter Schüttungen während des Grundwasseranstiegs am Beispiel einer Kippe des Lausitzer Braunkohlentagebaus.- In: HÜTTL, R.F., KLEM, D., WEBER, E. (Hrsg.) Ökologisches Entwicklungspotential der Bergbaufolgelandschaften im Niederlausitzer Braunkohlerevier, Teubner, Stuttgart, 199-218.
- WIESE, R.G., POWELL, M.A., FYFE, W.S. (1987) Spontaneous formation of hydrated iron sulfates on laboratory samples of pyrite- and marcasite-bearing coals.- Chemical Geology, 63, 29-38.
- WINKLER, F.-M. (1984) Ermittlung von geohydraulischen Kennwerten für das Kippenmaterial von Abraumförderbrücken-Kippen und Schlußfolgerungen für den Grundwasserwiederanstieg.- Neue Bergbautechnik, 14, 208-212.
- WISOTZKY, F. & KRINGEL, R. (1998) Möglichkeiten der Sanierung saurer Grundwässer durch induzierte pH-pe-Veränderung in Braunkohlenabraumkippen.- Proceedings des Dresdner Grundwasserforschungszentrums e.V., 6. Dresdner Grundwasserforschungstage.
-

- WISOTZKY, F. (1996) Hydrogeochemische Reaktionen im Sicker- und Grundwasserbereich von Braunkohlentagebaukippen.- Grundwasser, 2, 129-136.
- WISOTZKY, F. (1994) Untersuchungen zur Pyritoxidation in Sedimenten des Rheinischen Braunkohlenreviers und deren Auswirkungen auf die Chemie des Grundwassers.- Besondere Mitteilungen zum Deutschen Gewässerkundlichen Jahrbuch, Herausgegeben vom Landesumweltamt Nordrhein-Westfalen in Essen, 58, 1-153.
- WORCH, E. (1997) Wasser und Wasserinhaltsstoffe – Eine Einführung in die Hydrochemie.- Teubner, Stuttgart, 1-205.
- WÜNSCHE, M. (1991) Aspekte einer optimalen Nutzung der Bergbaufolgelandschaft.- Bodengeologische Arbeiten für die Gestaltung der Bergbaufolgelandschaft in Braunkohlenabbaugebieten.- Abhandlungen der Sächsischen Akademie der Wissenschaften zu Leipzig (Mathematisch-naturwissenschaftliche Klasse), 57, 73-80.
- WURL, J., MAHNHENKE, V. MÜNCH, U., SCHIRRMEISTER, W. (1996) Montanhydrogeologische Typisierung des Niederlausitzer Braunkohlenreviers.- In: GBL-Gemeinschaftsvorhaben Grundwassergüteentwicklung in den Braunkohlegebieten der neuen Länder, Heft 3, Schweizerbart, Stuttgart, 100-106.
- ZAKOSEK, H. & ZEPP, H. (1988) Wasser- und Stoffbewegung in Boden und Untergrund.- Jahresberichte und Mitteilungen des Oberrheinischen Geologischen Vereins, N.F. 70, 335-352.
- ZIEGENHARDT, W. (2000) Sanierung des Wasserhaushalts in den Braunkohlenrevieren Ostdeutschlands – erreichter Stand und künftige Aufgaben.- Freiburger Forschungshefte, C432, 7-24.
- ZIESCHANG, J. (1964) Die Bestimmung der Wasserdurchlässigkeit von Lockergesteinsgrundwasserleitern.- Zeitschrift für angewandte Geologie, 10, 364-370.
- ZWINGMANN, A. & WEIN, R. (1989) Anwendung der quantitativen Komplexinterpretation von Bohrlochmeßkurven auf Tagebaukippen.- Zeitschrift für Angewandte Geologie, 35, 50-53.
-

9 Inhalt Anlagenheft und Anlagenband

Anlagenheft

Die Kennzeichnung der Veränderung wichtiger petrographischer, petrophysikalischer und stofflicher Eigenschaften in den AFB-Innenkippen Seese-Ost und Meuro erfolgt *parameterweise* in den Stufen 1. bis 3.

Lageplan AFB-Innenkippe Tagebau Seese-Ost (S) Untersuchungsbohrungen, Profilschnittspuren, Einheiten des Geologischen Baus
Lageplan AFB-Innenkippe Tagebau Meuro (M) Untersuchungsbohrungen, Profilschnittspuren

		1.	2.	3.
		Teufenprofile der Parameter	Kippengeologische Profilschnitte, Nr.	Raumbild – Intervalle
	Parameter	Trockenkern- (TB) und Spülbohrungen (SB), angeordnet in Profilschnittspuren nach Strossen- und Aufschwenkrichtung	Seese 1 5 4 8 Meuro 5 4 6 10 12 Maßstab H 1 : 20.000 V 1 : 1.200	des Grundwasserwiederanstiegs nicht maßstäblich
Gefüge	Kornsummenk.	-	-	-
	Md	-	-	-
	U	-	-	-
	<0,063mm	TB + SB	TB + SB	-
	GAMMA-Log	-	TB + SB	-
	kf	TB + SB	TB + SB	TB + SB
	RHOR	-	-	-
	n	TB + SB	TB + SB	-
Stoff	DENSITY-Log	-	TB + SB	-
	C	-	-	-
	FeS2 (S)	TB	TB + SB	TB + SB
	Fe	-	-	-
	Al	TB	TB + SB	TB + SB
	Ti	-	-	-
	CaCO3 (Ca)	TB	TB + SB	TB + SB
	Mn	-	-	-
	Co	-	-	-
	Ni	-	-	-
	Zn	-	-	-

Anlagenband

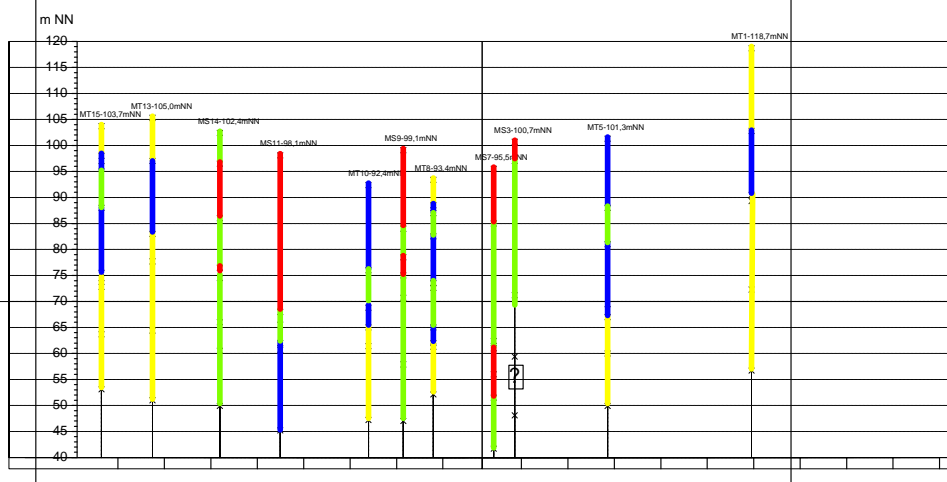
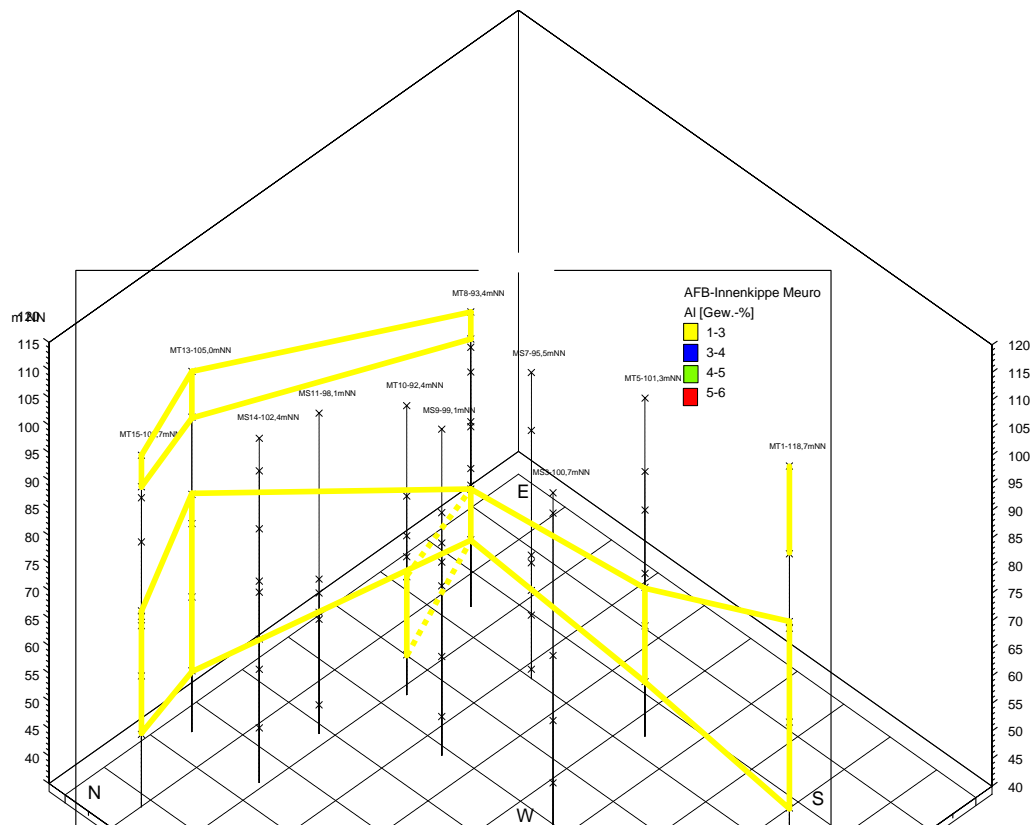
Lageplan AFB-Innenkippe Tagebau Seese-Ost (S) Untersuchungsbohrungen, Profilschnittspuren, Einheiten des Geologischen Baus
 Lageplan AFB-Innenkippe Tagebau Meuro (M) Untersuchungsbohrungen, Profilschnittspuren

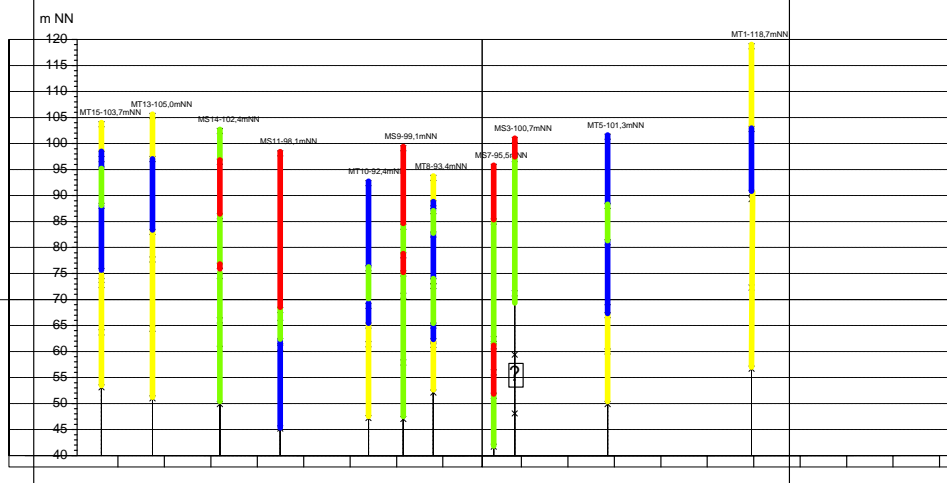
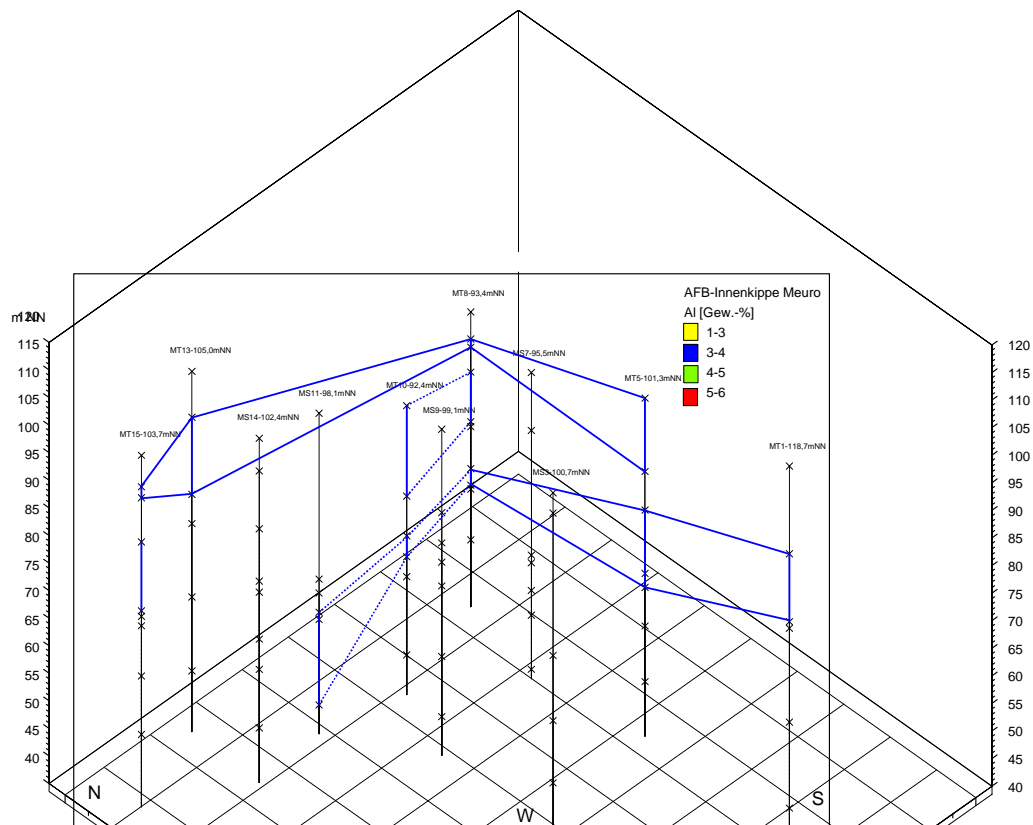
		1.		2.	3.
		Teufenprofile Parameter	der	Kippengeologische Profilschnitte, Nr.	Raumbild – Intervalle
	Parameter	Trockenkern- (TB), Spülbohrungen (SB), angeordnet in Profil- schnittspuren nach Strossen- und Auf- schwenkrichtung	Anlage-Nr.	Seese 1 3 5 7 2 4 6 8 Meuro 1 3 5 7 4 6 8 10 12 Maßstab H 1 : 12.500 V 1 : 750	des Grundwasserwiederanstiegs nicht maßstäblich
Gefüge	Kornsummenk.	TB	1.1	-	-
	Md	TB		-	-
	U	TB		-	-
	<0,063mm	TB + SB		TB + SB	-
	GAMMA-Log	-		TB + SB	-
	kf	TB + SB	1.2	TB + SB	TB + SB
Stoff	RHOR	TB + SB		-	-
	n	TB + SB		TB + SB	-
	DENSITY-Log	-		TB + SB	-
	C	TB	1.3	-	-
	FeS2 (S)	TB		TB + SB	TB + SB
	Fe	TB		-	-
	Al	TB	1.4	TB + SB	TB + SB
	Ti	TB		-	-
	CaCO3 (Ca)	TB	1.5	TB + SB	TB + SB
	Mn	TB		-	-
	Co	TB	1.6	-	-
	Ni	TB		-	-
	Zn	TB		-	-

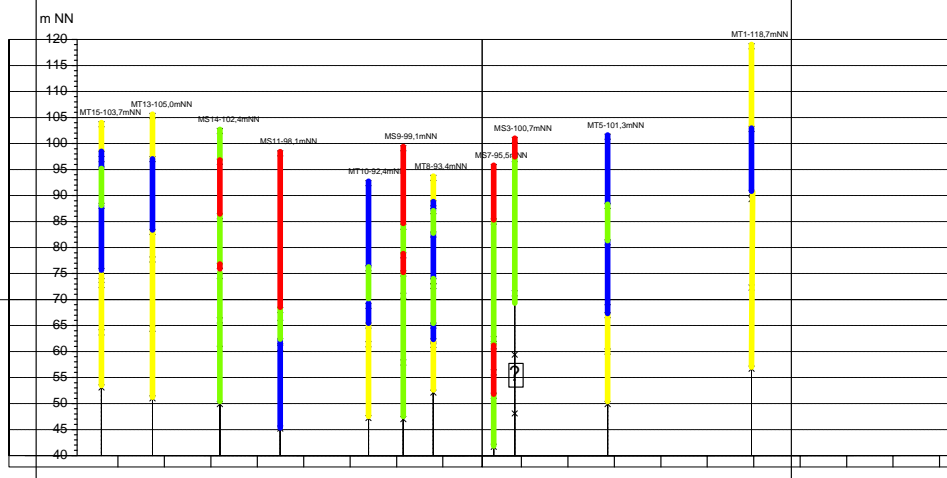
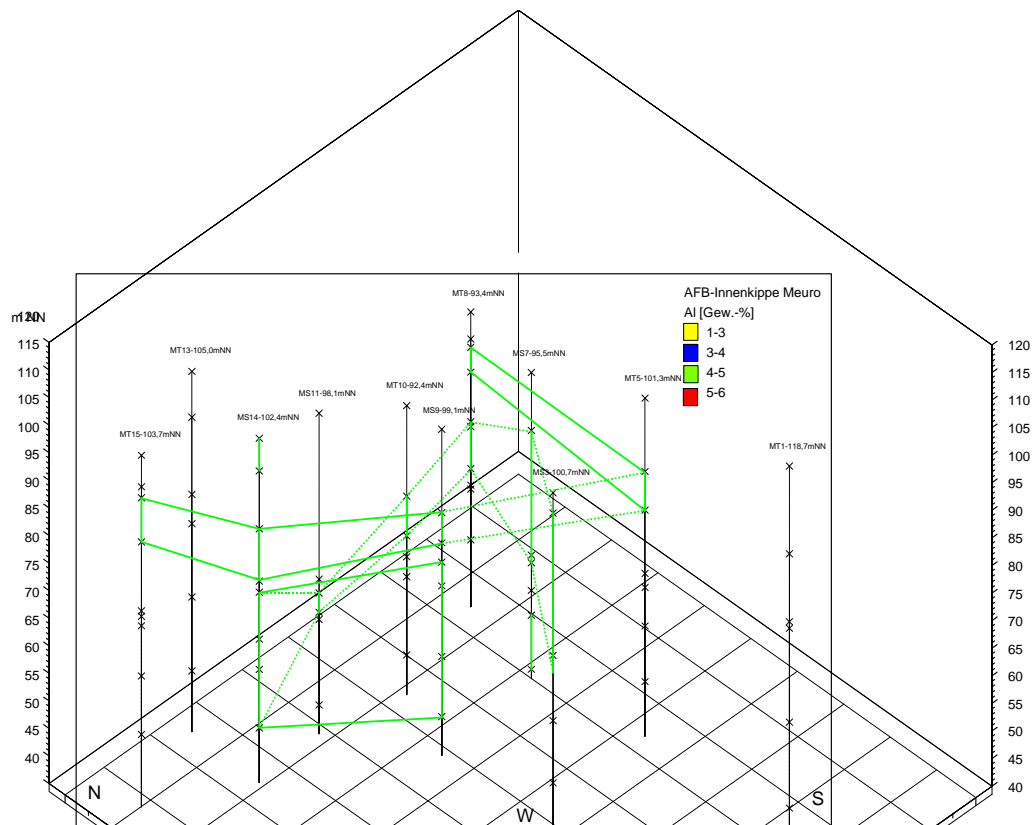
Schichtenverzeichnisse der Bohrungen

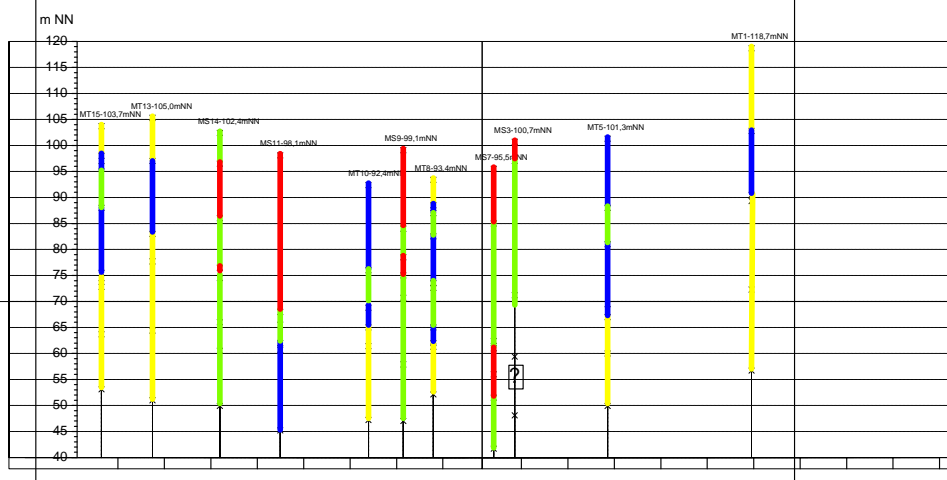
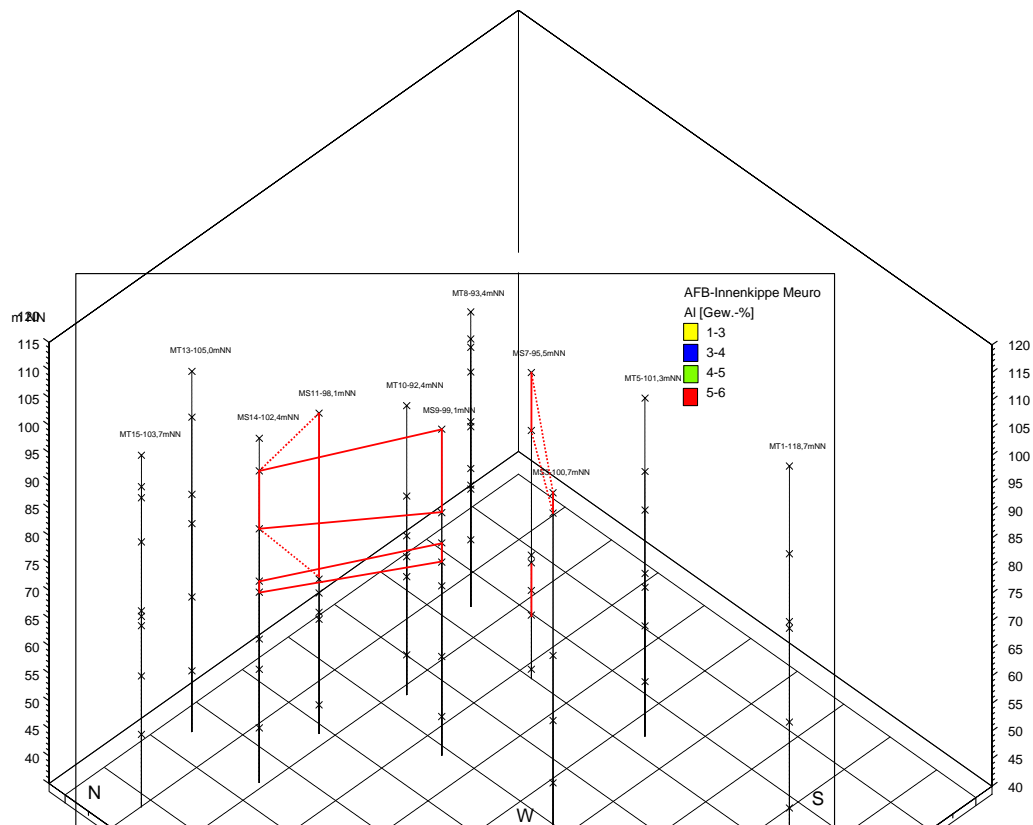
Abbildung 1-1 Geologische Kippenerkundung, Kippbodenkartierung und Standsicherheitsuntersuchung in Raum, Oberfläche und Uferlinie Restlochsee von AFB-Innenkippen, nach G. Voigt 2002.....	15
Abbildung 2-1 (S. 22) Geologische Übersichtskarte Niederlausitzer Braunkohlenrevier, Nowel 1995.	23
Abbildung 2-2 (S. 23) Regionalgeologischer Schnitt (S) - (N) Tagebau Meuro – Calau - Tagebau Seese-Ost. Deutlich werden Merkmale der Veränderung: Calau: Tertiär über 250 mächtig, Quartär fehlt; Burg, Pleistozäne Rinnen: Quartär bis 180 m, Tertiär fehlt, Nowel 1995.	24
Abbildung 2-3 Die Nordwesteuropäische Tertiärsenke im Untermiozän, aus Suhr 1995.	27
Abbildung 2-4 Unterschiedliche „Reichweite“ der Transgressionen während des Tertiärs in den Niederlausitzer Raum, 1-tektonische Impulse, Diskordanzen, 2-Basaltvulkanismus, Brause et al. 1989.....	29
Abbildung 2-5 Generalisierte Geologische Schichtenfolge des Tertiärs in der Niederlausitz, aus Nowel et al. 1994. Entwicklung als Sedimentationsraum von Nordwesten nach Südosten.	30
Abbildung 2-6 Haupteisrandlagen (Stadiale) und Urstromtäler der nordeuropäischen Vereisungen im Mitteleuropäischen Tiefland, Liedke 1981; Stadiale P, F, B, W, D siehe Tabelle 2-1.	33
Abbildung 2-7 Dachziegelartige Anordnung der Ablagerungen der Glazialzeiten in der Niederlausitz in einem Nord-Süd – Profil; der älteste Eisvorstoß erreichte maximale Ausdehnung nach Süden, nach Eissmann & Müller 1979 in Walter 1995.	35
Abbildung 2-8 Die Glaziale Serie – Lage und Angaben zur petrographischen Zusammensetzung der Ablagerungseinheiten, aus Nowel 1995, Legende (1)-(12) in Tabelle 2-3.	40
Abbildung 2-9 Die unterschiedlich weit nach Süden reichende Entwicklung von Zwischenmitteln (ZM) im 2. Lausitzer Flöz. Ausbildung 3er ZM im nördlich gelegenen Tagebau Seese-Ost, keine ZM im Tagebau Meuro, ergänzt nach Suhr et al. 1992. Haupttransgressionsrichtung während der Flözbildungszeit ist von NW nach SE, vgl. Brause et al. 1989.	42
Abbildung 2-10 Abraumförderbrückenbetrieb, Braunkohlentagebau „Seese-Ost“, Abbaurichtung (\leftarrow), Blick in Strossenrichtung (\longleftrightarrow), Schroeder & Nowel 1995.	43
Abbildung 2-11 A, B Bei der Entstehung der AFB-Innenkippen wirksame Abbaurichtung (\rightarrow), Strossenrichtung (\longleftrightarrow), Grundrisse nach Gruschka 1992, $\nabla\nabla\nabla$ Baggerböschungen, YYY Kippenböschungen.	44
Abbildung 2-12 Innerhalb eines Rückintervalls „wachsen“ die kontinuierlich in „Schüttungsschichten“ geschütteten Abraummassen zu einer „Schüttungsrippe“ auf. Die Aneinanderreihung der Schüttungsrippen ist Strukturmerkmal der AFB-Kippen. Schnitt quer zur Strossenrichtung, winkeltreue Darstellung ($M_{\text{vertikal}}=M_{\text{horizontal}}$), Vergenz in Abbaurichtung.	46
Abbildung 2-13 Abgrabung des Flöz-Deckgebirges in Hochschnitt HS - 1. Abraumschnitt' und Tiefschnitt TS - 2. Abraumschnitt'', häufig entsprechend Tertiär-Quartär-Grenze (a), Mitabgrabung von 10 bis 15 cm „Ungeschichtete Kohle“ im Hangenden des Flözes (b), Nichtabgrabung von 10 bis 15 cm „Xylitische Kohle“ im Liegenden des Flözes (c), nach G. Voigt 1997.....	48
Abbildung 3-1 Lage der Untersuchungsbohrungen (Trockenkern- (\square) und Spülbohrungen (Δ) in AFB-Innenkippe Förderbrückentagebau Seese-Ost – Profilschnitt-Spuren orientiert an der strukturge-netischen Aufschwenkrichtung \rightarrow und Strossenrichtung \longleftrightarrow . Die Systematik der Bohrungsbezeichnung folgt der Entwicklung der Tagebaue nach diesen Richtungen, Thiemig 2000, erweitert.	52
Abbildung 3-2 Lage der Untersuchungsbohrungen (Trockenkern- (\square) und Spülbohrungen (Δ) in AFB-Innenkippe Förderbrückentagebau Meuro – Profilschnitt-Spuren orientiert an der strukturge-netischen Aufschwenkrichtung \rightarrow und Strossenrichtung \longleftrightarrow . Die Systematik der Bohrungsbezeichnung folgt der Entwicklung der Tagebaue nach diesen Richtungen, Thiemig 2000, erweitert.	53
Abbildung 3-3 Teilungsplan zur Herstellung der Proben für die Bestimmung petrographischer und mineralogisch-geochemischer Parameter der Abraummischung, Beispiel AFB-Innenkippe Meuro.....	60
Abbildung 3-4 Kennzeichnung der Parameterveränderung im Kippenkörper – Beispiel Fraktion < 0,063 mm, Seese-Ost, (A) Teufenprofile, (B) Konstruierter Profilschnitt.	65
Abbildung 3-5 (folgende Seite) Raumbild (A), Darstellung zur Ableitung der Kippenwasserbeschaffenheit in 5m-Grundwasser-Aufstiegsscheiben (B), Beispiel Seese-Ost.	66
Abbildung 4-1 (folgende Seite) Geologische Schnitte Tagebau Seese-Ost, (A) SW – NE, (B) W – E, aus Rahmenbetriebsplan Tagebau Seese-Ost (ab 1994), LAUBAG.	70
Abbildung 4-2 Tertiär- und Pleistozän-Schichtenfolge im Bereich der „Radduscher Störungszone“, nicht maßstäblich, nach Angaben Thiemig 2000.	73
Abbildung 4-3 Geologisches Schichtenprofil – Abraumschnitte – Bauschema der AFB-Innenkippe Seese-Ost.75	
Abbildung 4-4 Normalprofil Tagebau Meuro mit Darstellung der „Hinterlassenschaften des Oberflözbergbaus“ und Pleistozänen Auswaschungsrinnen innerhalb und randlich des Kohlefeldes. Die Rinnen zeigen Abbiegung der Schichtenfolge zur Rinnenachse, eingelagerte Schollen und Steinfälle. Prinzipskizze, Stratigraphische Bezeichnungen in der Legende, Lorke 2000.	77
Abbildung 4-5 (folgende Seite) Geologisches Schichtenprofil – Abraumschnitte – Bauschema der AFB-Innenkippe Meuro, Teilfeld Großbräsen.	81

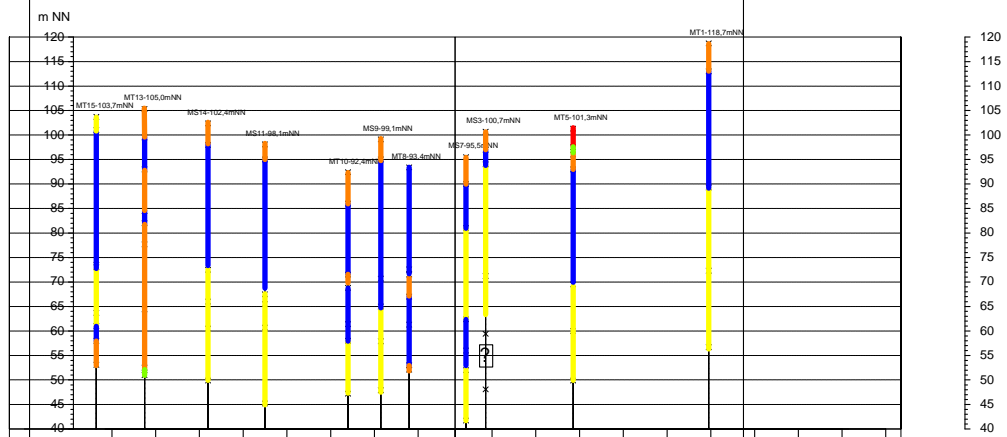
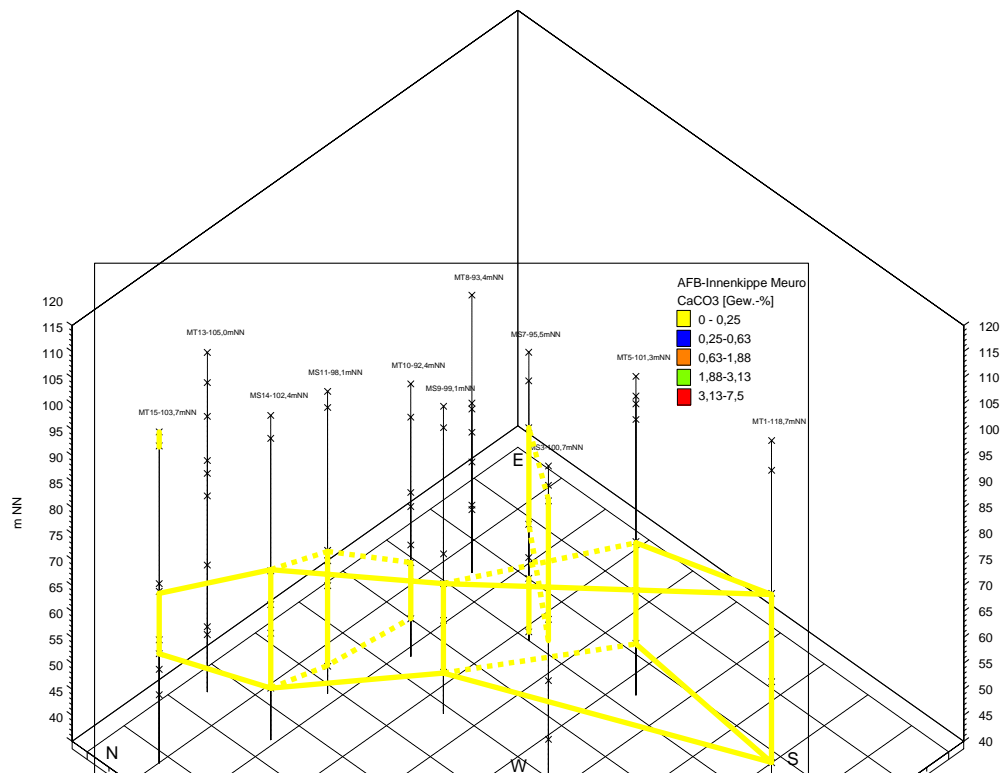
Abbildung 5-1 Meßwert GAMMA-Log [API] in Abhängigkeit vom Feinkornanteil, Abraumschüttung Seese-Ost (A), Abraumschüttung Meuro (B).....	94
Abbildung 5-2 Abhängigkeit des Durchlässigkeitsbeiwerts von der Korngrößenverteilung von Lockergesteinen, Breddin (Krapp 1983) in Prinz 1997.....	102
Abbildung 5-3 Dichte RHOR, abhängig von Ungleichförmigkeitszahl (A), und abhängig vom Korngrößenmedian (B), Abraummischung Seese-Ost.	112
Abbildung 5-4 Dichte RHOR, abhängig von Ungleichförmigkeitszahl (A), und abhängig vom Korngrößenmedian (B), Abraummischung Meuro.	114
Abbildung 5-5 Beispiel einer „rollig – bindig“ Wechsellagerung im GAMMA-Log, Bohrung ST10, AFB–Innenkippe Seese–Ost, rollig < 30API, bindig > 30API.	128
Abbildung 6-1 Gehalte Gesamtschwefel gegen Gesamtkohlenstoff, Abraummischung Tagebau Seese-Ost (A) und Tagebau Meuro (B).	149
Abbildung 6-2 Eisengehalte in Beziehung zum Anteil an Fraktion < 0,063 mm (A) und in Beziehung zum Schwefel (B), Abraummischung Tagebau Seese-Ost.	164
Abbildung 6-3 Gehalte Kobalt in Beziehung zum Nickelgehalt (1:4), Feinfraktion Abraummischung Tagebau Seese-Ost (A) und Meuro (B).	173
Abbildung 6-4 Gehalte Aluminium in Beziehung zum Feinfraktionsanteil, Abraummischung Tagebau Seese-Ost (A) und Meuro (B).	183
Abbildung 6-5 Titan in Abhängigkeit vom Aluminium, Abraummischung Seese-Ost (A) und Meuro (B).....	187
Abbildung 6-6 Gehalte Calcium in Beziehung zum Feinfraktionsanteil, Abraummischung Tagebau Seese-Ost (A) und Meuro (B).	195
Abbildung 6-7 Gehalte Mangan in Beziehung zum Calciumgehalt, Feinfraktion Abraummischung Tagebau Seese-Ost (A) und Meuro (B).	201
Abbildung 6-8 Gehalte Mangan gegen Gesamtkohlenstoff, Feinfraktion Abraummischung Tagebau Seese-Ost (A) und Meuro (B).	202
Abbildung 7-1 Oxidation von Pyrit durch Fe(III) im Labor bei pH 1,89 und 30°C, Appelo & Postma 1996.	208
Abbildung 7-2 Entwicklung der Grundwasserabsenkungstrichter Niederlausitzer Braunkohlenrevier 1993 ... 2020; 1–Stand 1993; 2–Stand 2020; 3–Flächen mit weiterer Inanspruchnahme statischer Grundwasservorräte bis 2020; 4–stillgelegte bzw. Ausläufertagebaue, 5–Langläufertagebaue mit Abbaurichtung, verändert nach Eckhardt 1995.....	222
Abbildung 7-3 Die Schichtenfolge des Tertiär im Niederlausitzer Braunkohlenrevier mit Bezeichnung der GWL, Meinert et al. 1986 in Jordan & Weder 1995.	225
Abbildung 7-4 Hydrogeologisches Untersuchungsgebiet Schlabendorf, Kontur Tagebau Seese-Ost, „Bischdorfer See“ und „Kahnsdorfer See“ (im NE) schraffiert, Grundwasser-Isohypsen [mNN], Juli 1958, erweitert nach Milde 1961.	228
Abbildung 7-5 Lage Tagebau Seese-Ost (Bereich der Nordfelder) und Tagebau Meuro (Zentralrevier um Senftenberg) im System der häufig kohlenfeldbegrenzenden pleistozänen Rinnen des Niederlausitzer Braunkohlenreviers, Legende: 1-Zweites Lausitzer Flöz, 2-Braunkohlentagebau, 3–Grube in bzw. außer Betrieb (1993), 4–Störung im Lausitzer Flöz, 5–Isohypsen Quartärbasis in tiefen Rinnen außerhalb Braunkohlefelder, 6–Spurlinie ... entfällt, verändert nach Nowel 1995.....	230
Abbildung 7-6 Gebiet Tagebau Meuro – Teilfeld Großbräsen, „Ilse-See“ schraffiert, Grundwasser-Isohypsen [m NN] 1 : 50.000 – Grundwasserabstrom von der ehemaligen Raunoer Hochfläche in Richtung Süd und Südost zum Urstromtal, erweitert nach LMBV.....	233
Abbildung 7-7 (folgende Seite) Entwicklung der Kippenwasserbeschaffenheit in 5 m Aufstiegs-Scheiben der AFB-Innenkippe Seese-Ost; oberhalb höchster Kippenwasserspiegel: Sickerwassereinfluß. Die Bedingungen zur Aufstellung der Bilanz aus Versauerungs- und Pufferreaktion sind im Abschnitt „7.1.3.1 Grundwasseranstieg (unterer Teil)“ erläutert.	236
Abbildung 7-8 (vorhergehende Seite) Entwicklung der Kippenwasserbeschaffenheit in 5 m Aufstiegs-Scheiben der AFB-Innenkippe Meuro; oberhalb höchster Kippenwasserspiegel: Sickerwassereinfluß. Die Bedingungen zur Aufstellung der Bilanz aus Versauerungs- und Pufferreaktion sind im Abschnitt „7.1.3.1 Grundwasseranstieg (unterer Teil)“ erläutert.	243

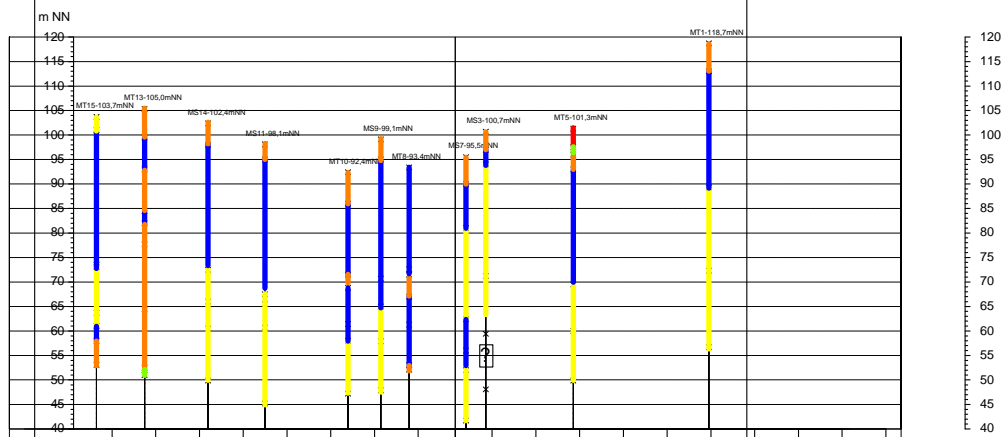
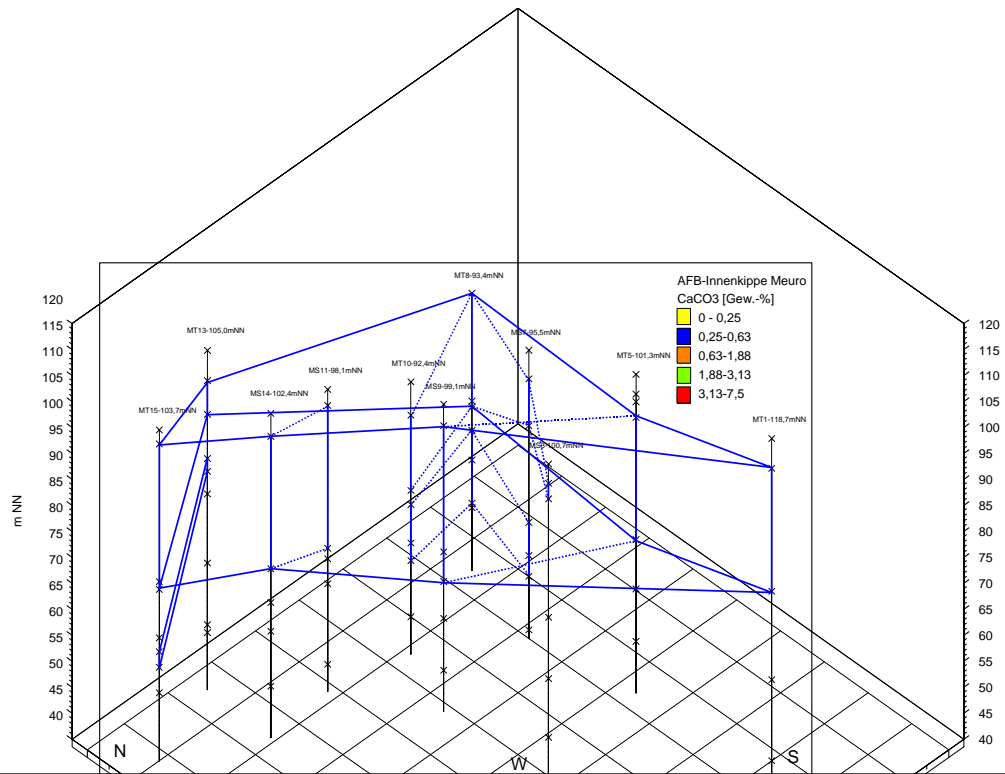


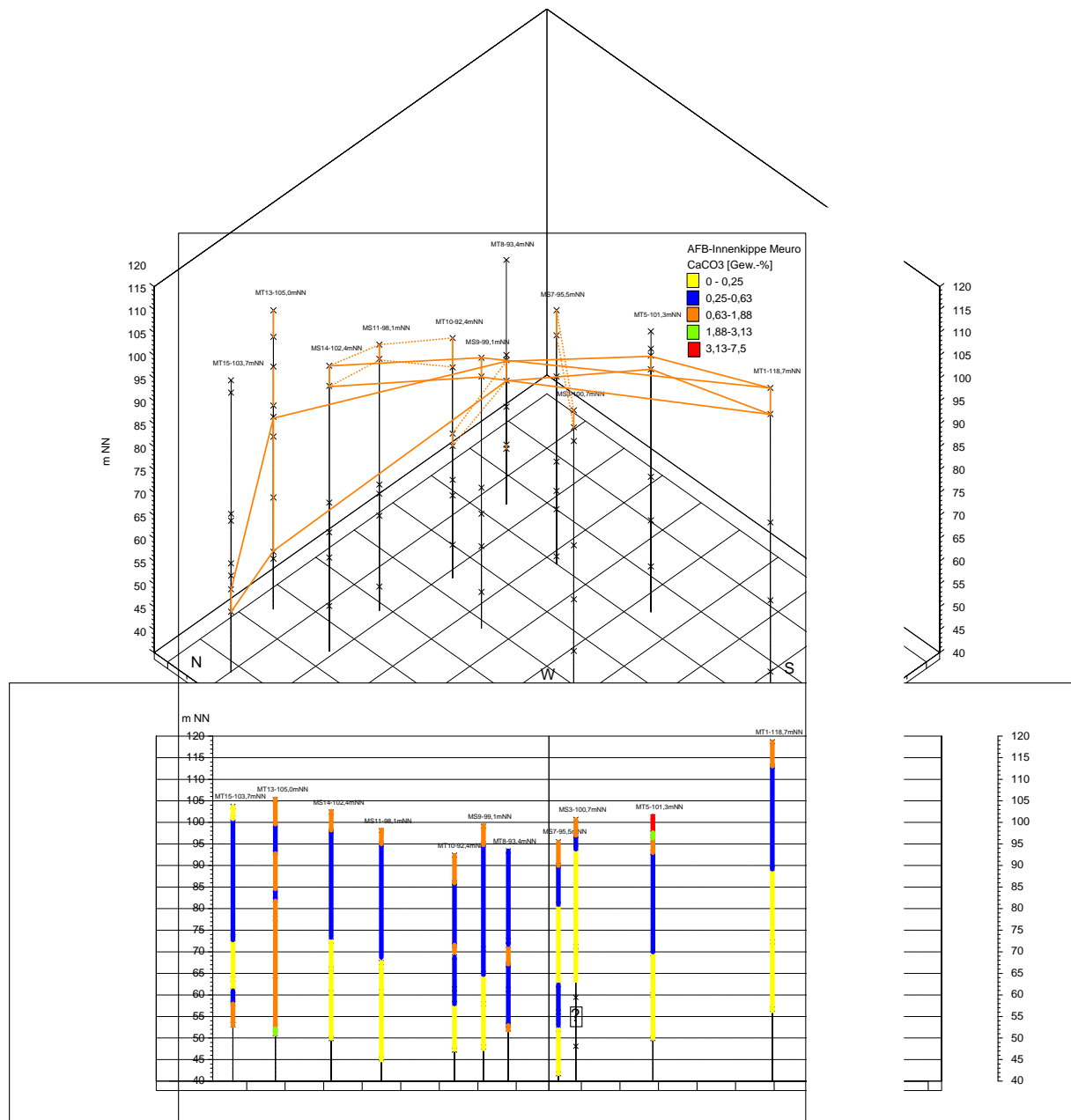


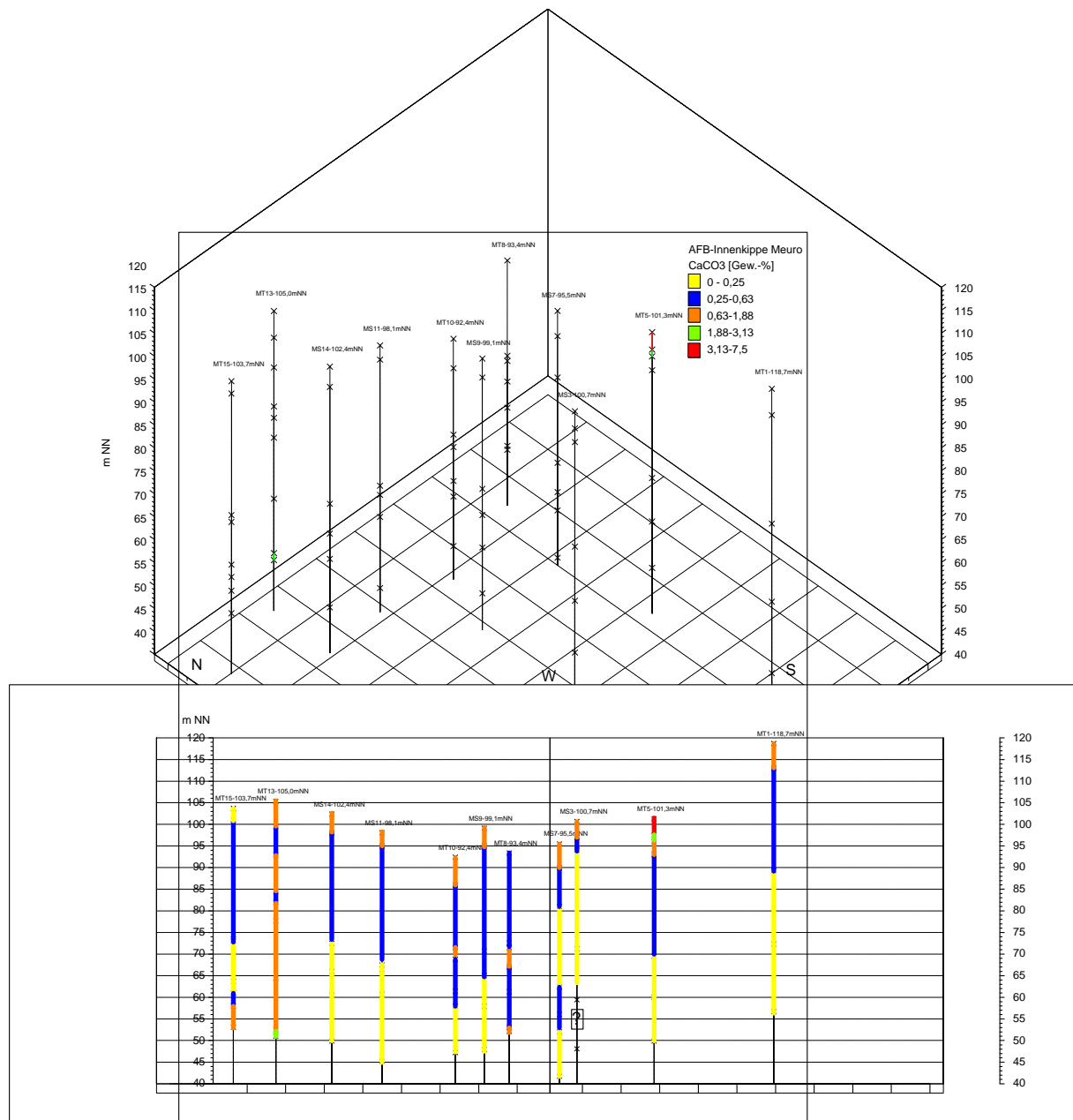


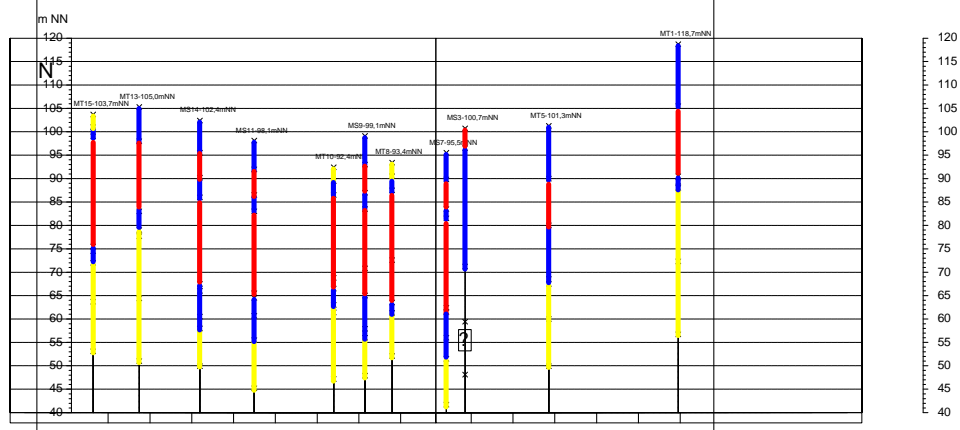
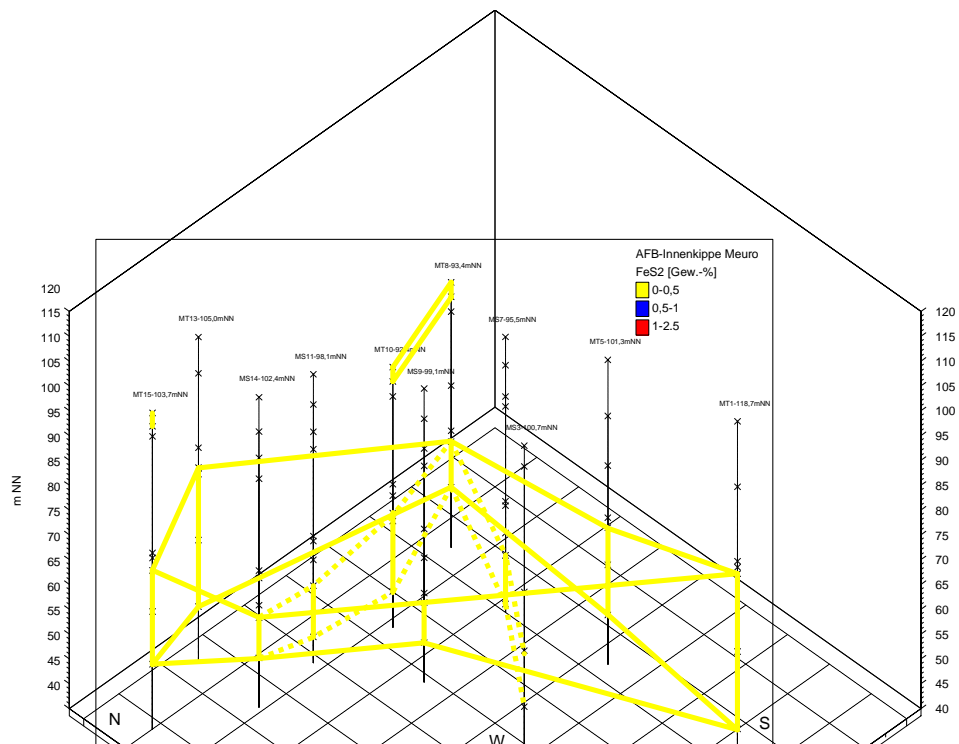


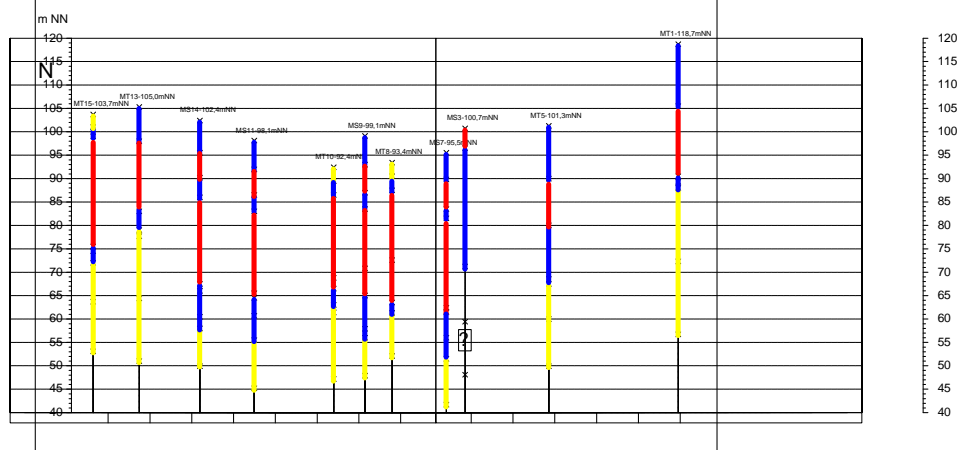
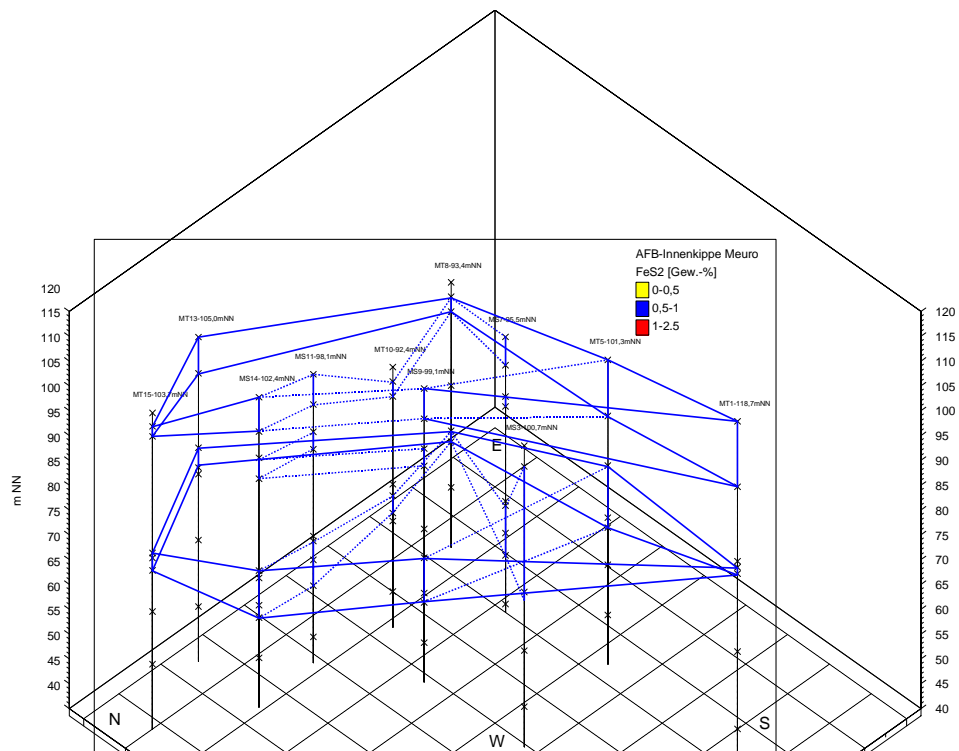


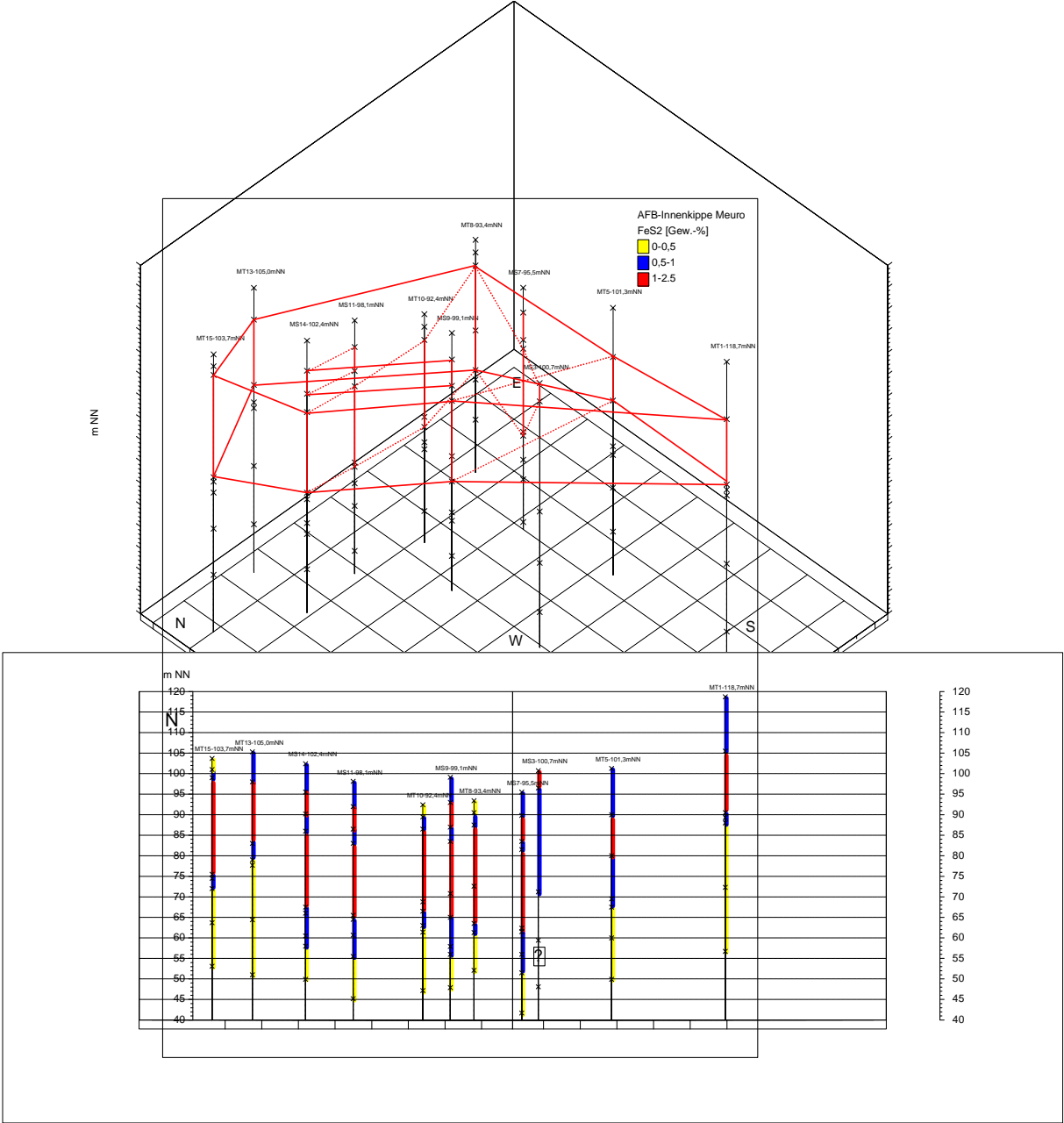


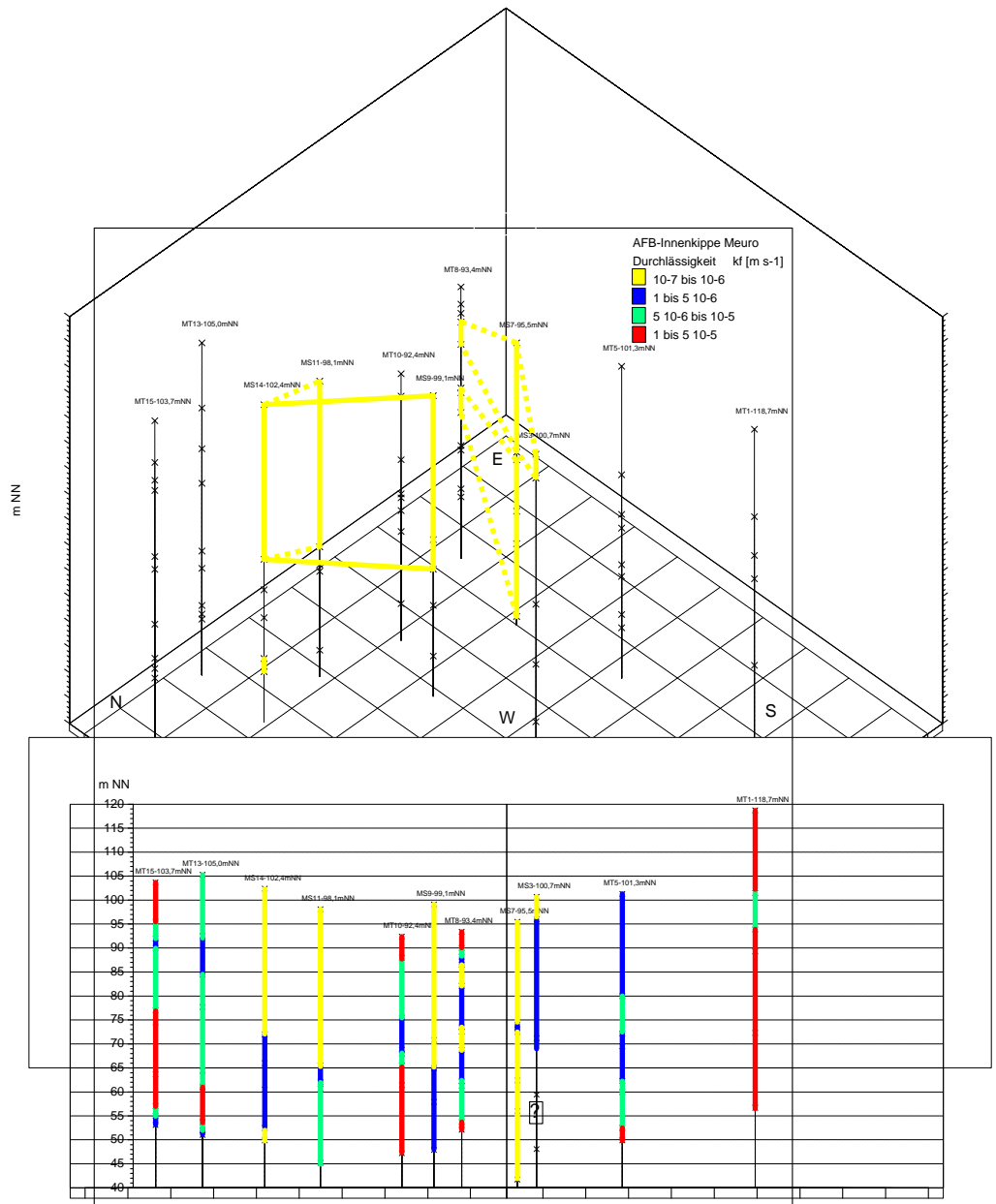


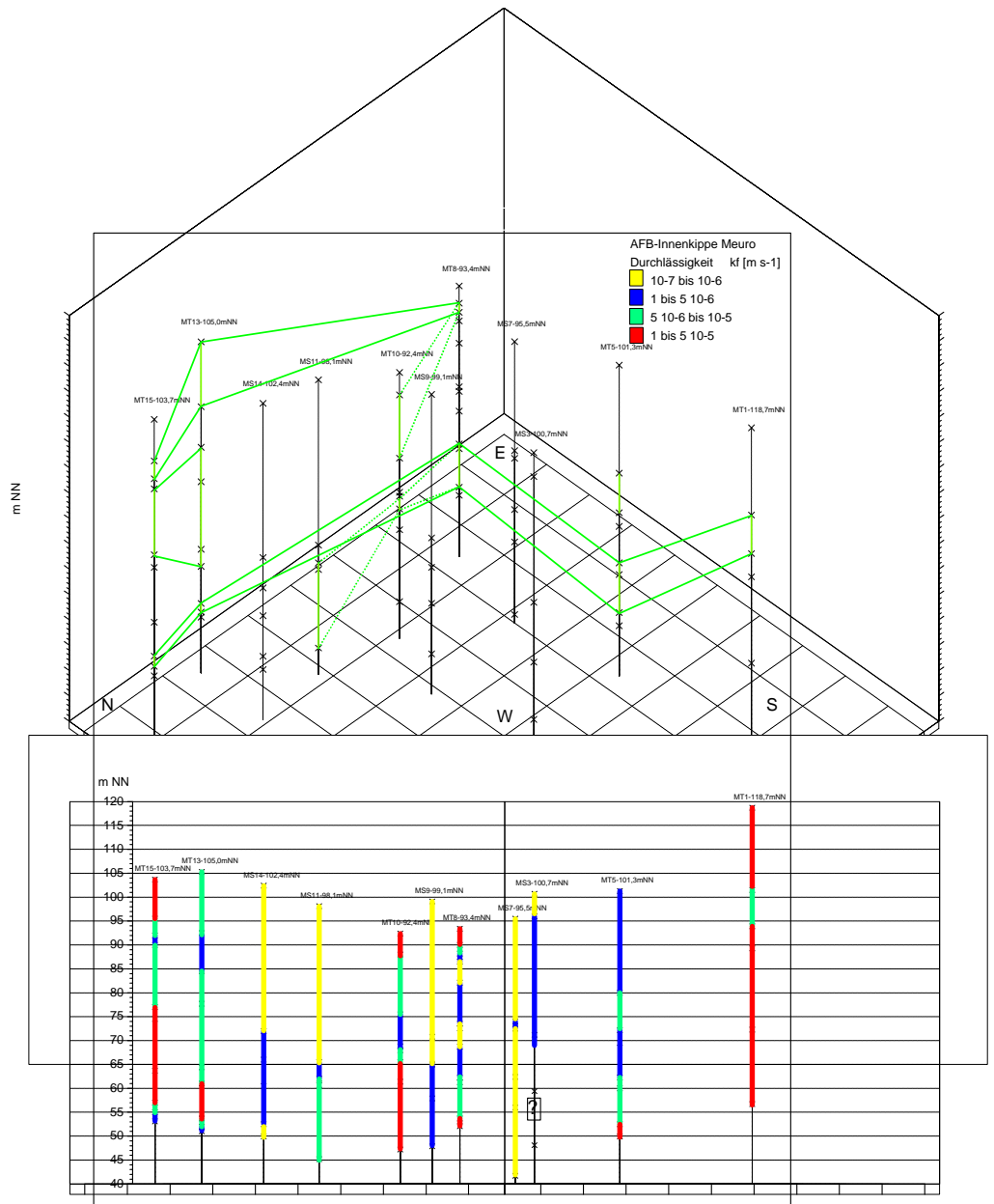


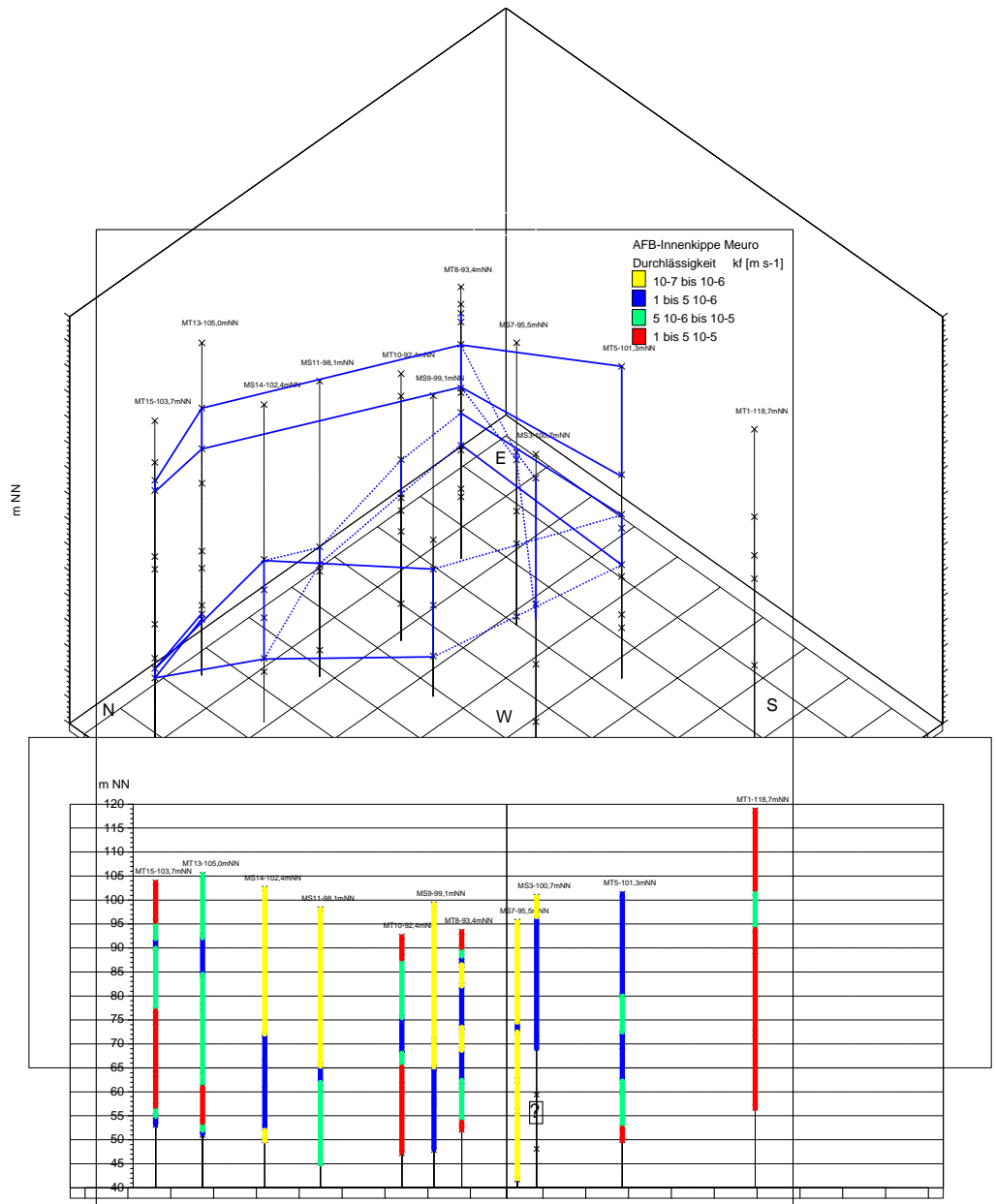


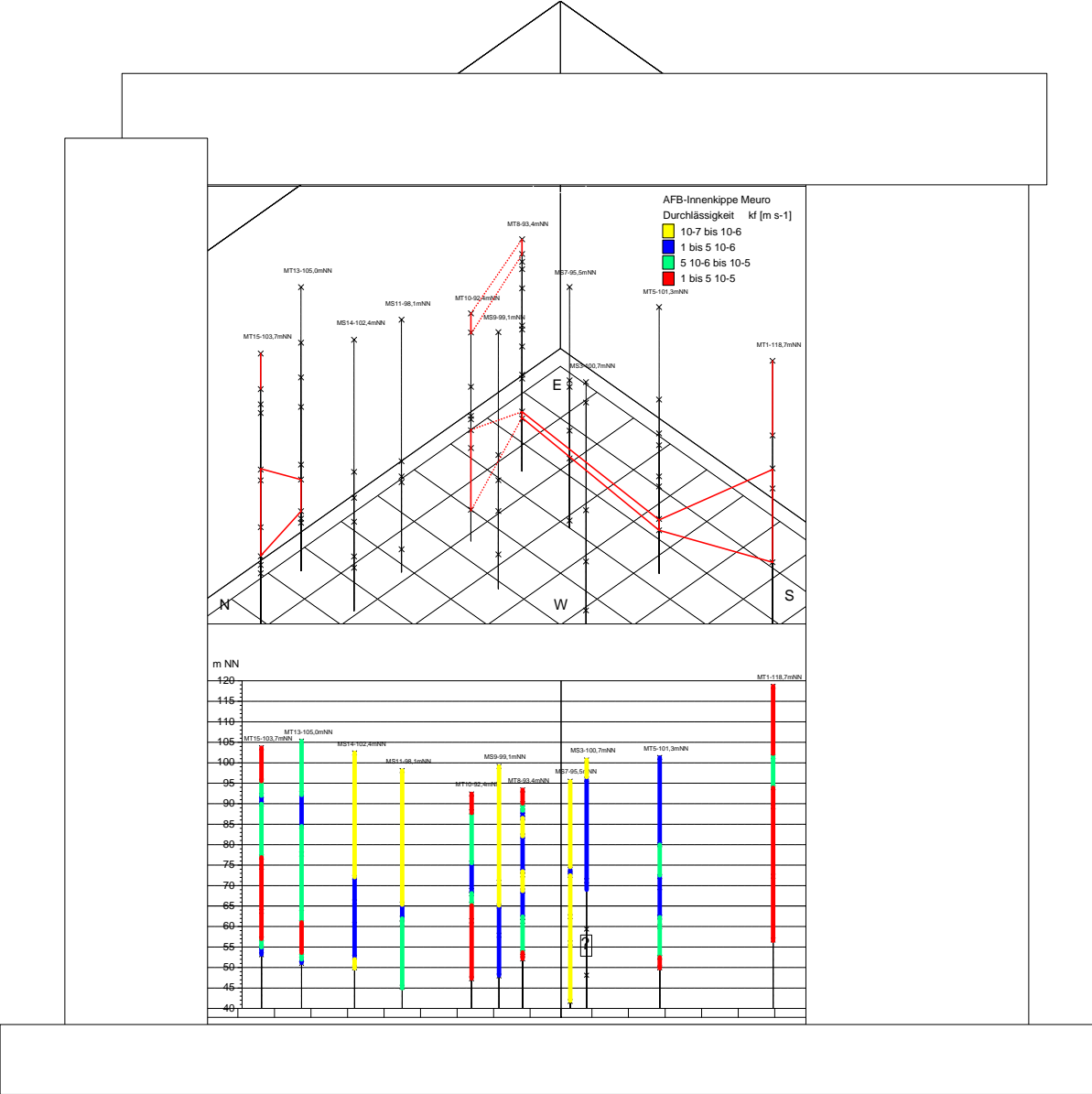


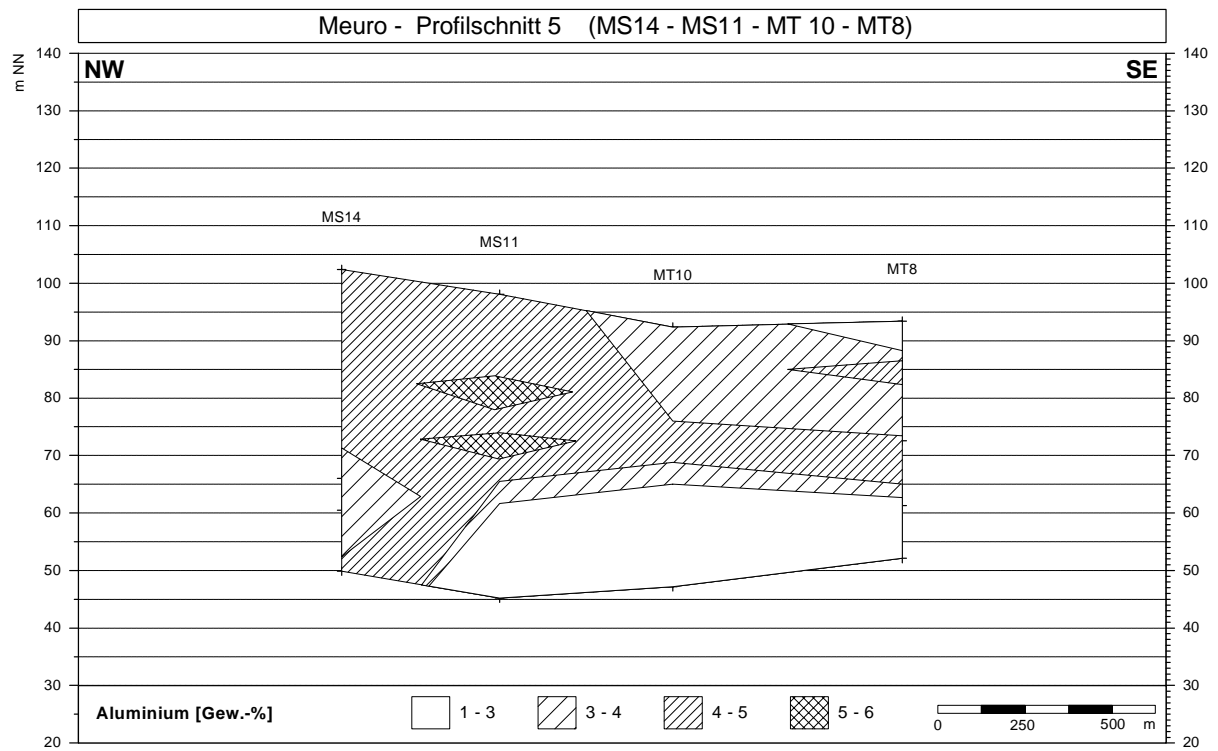
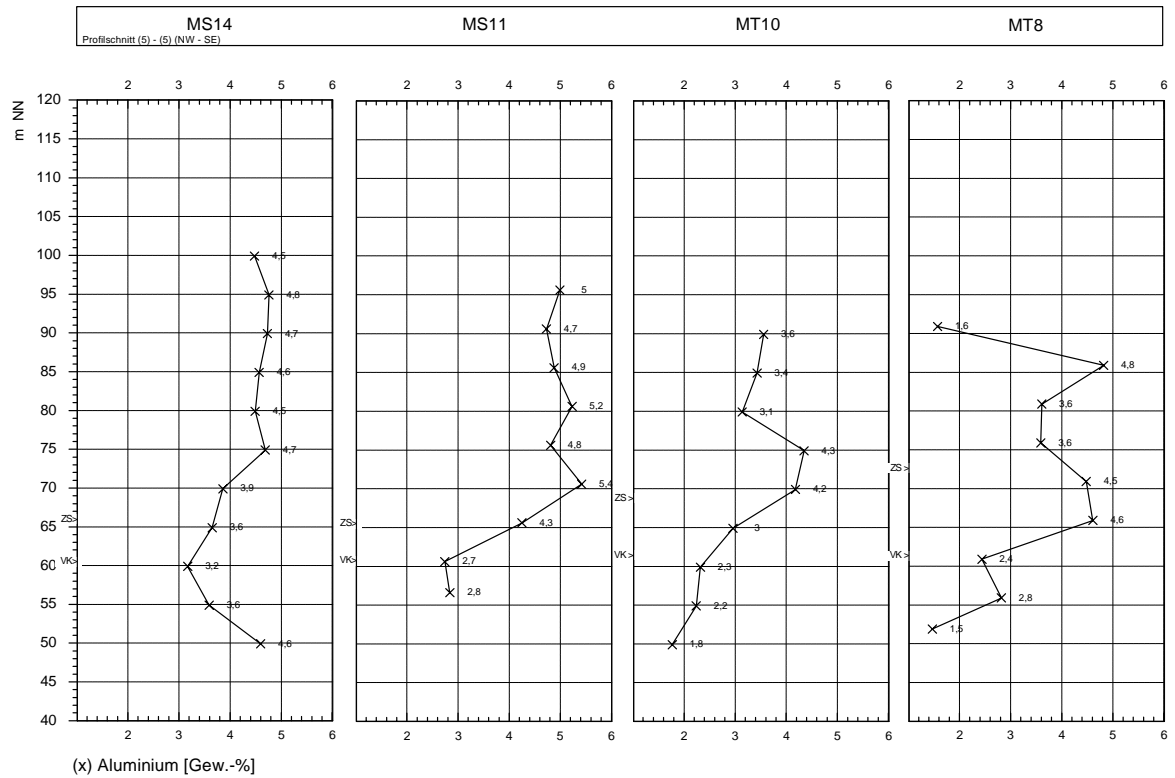


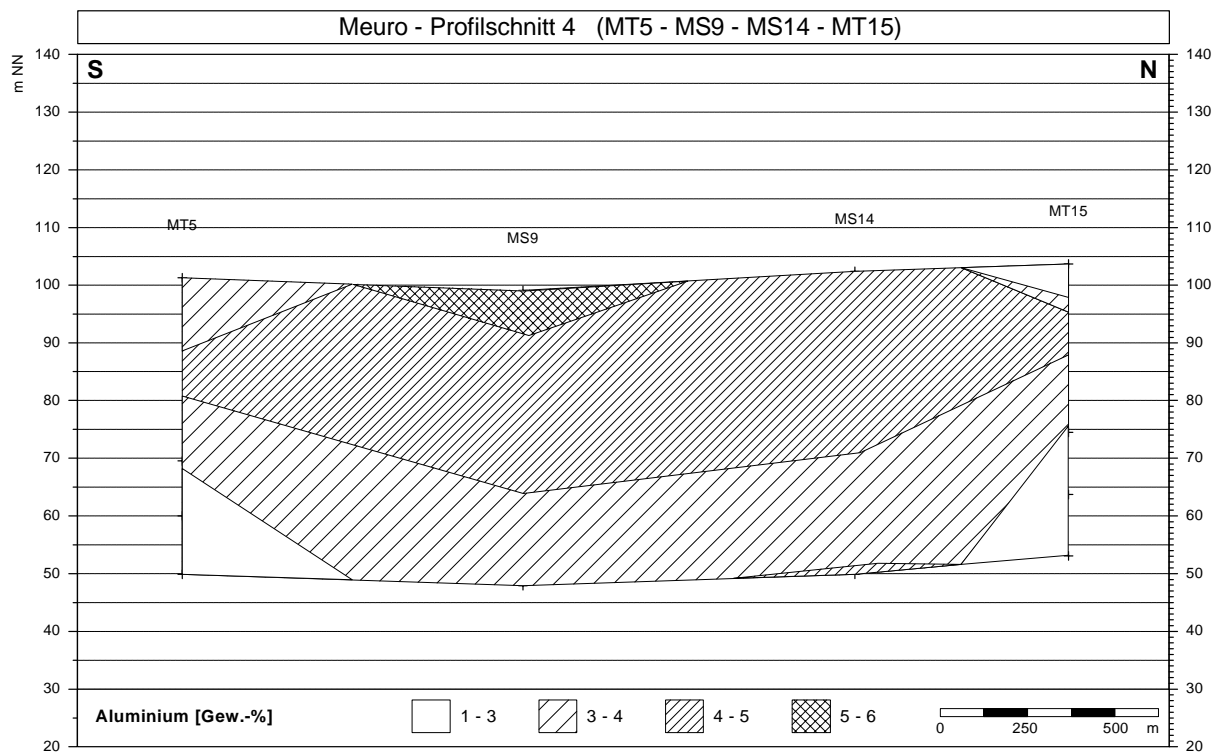
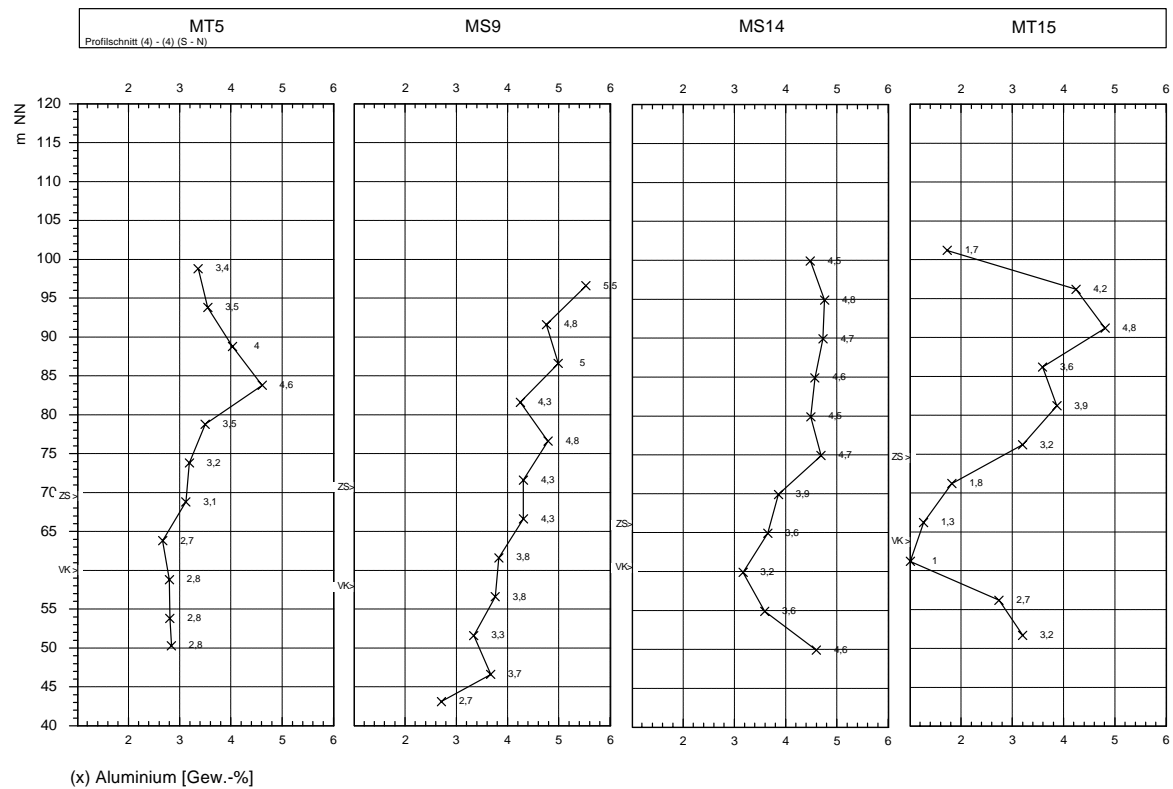


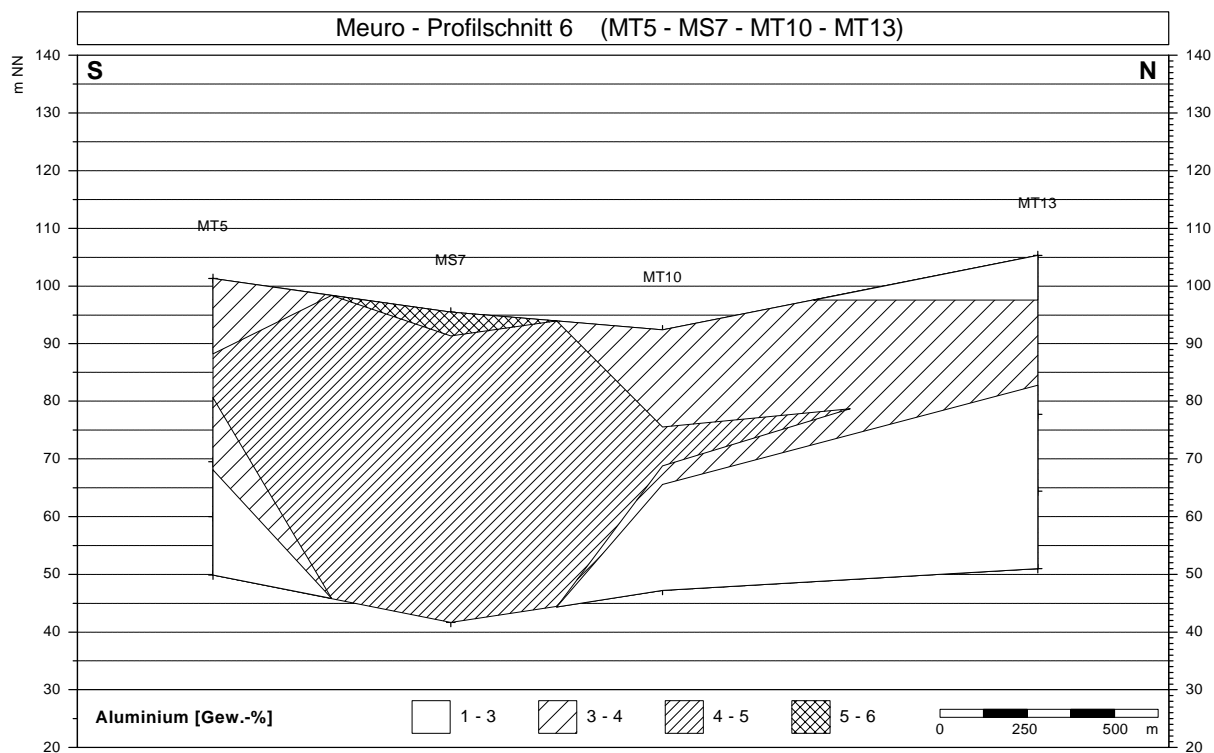
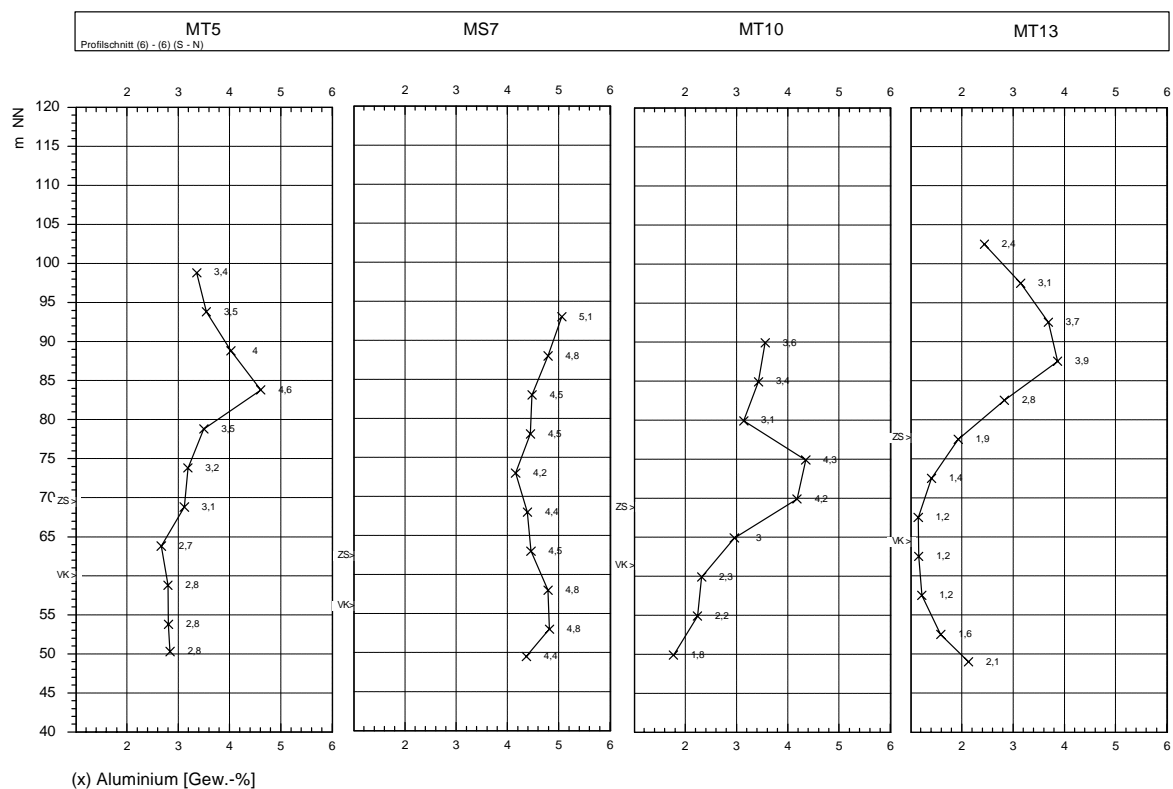


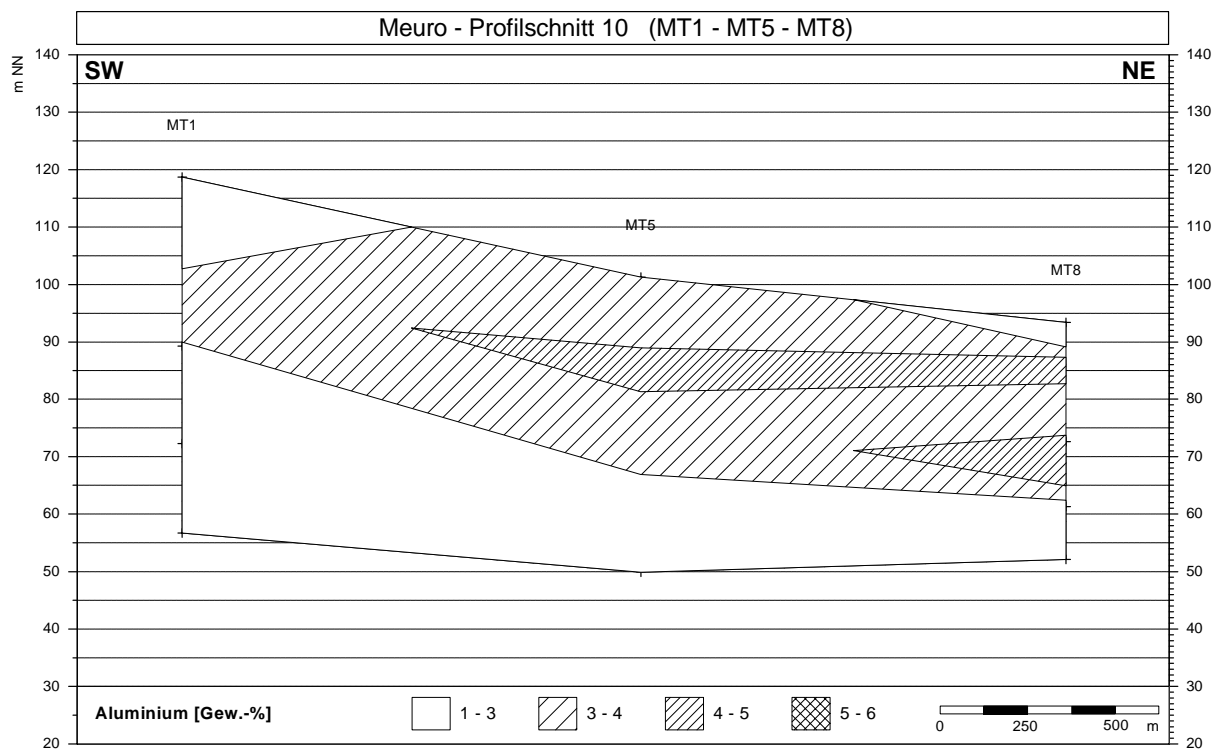
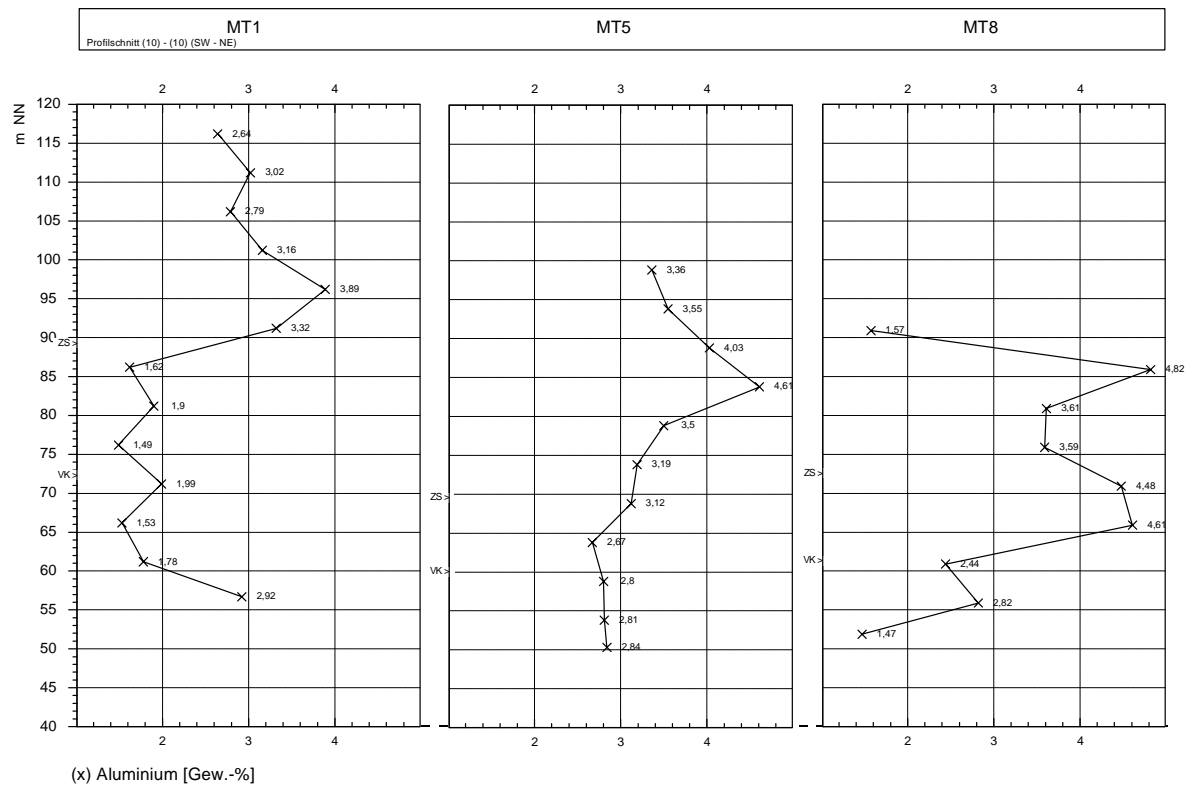


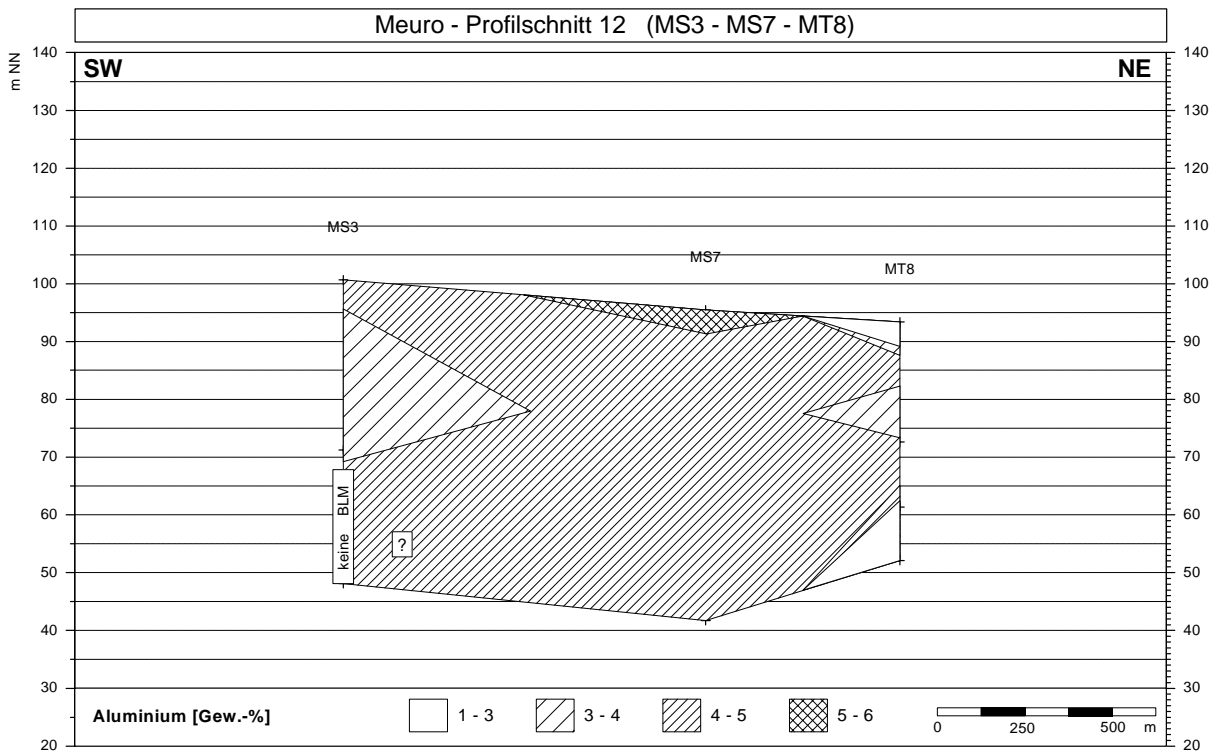
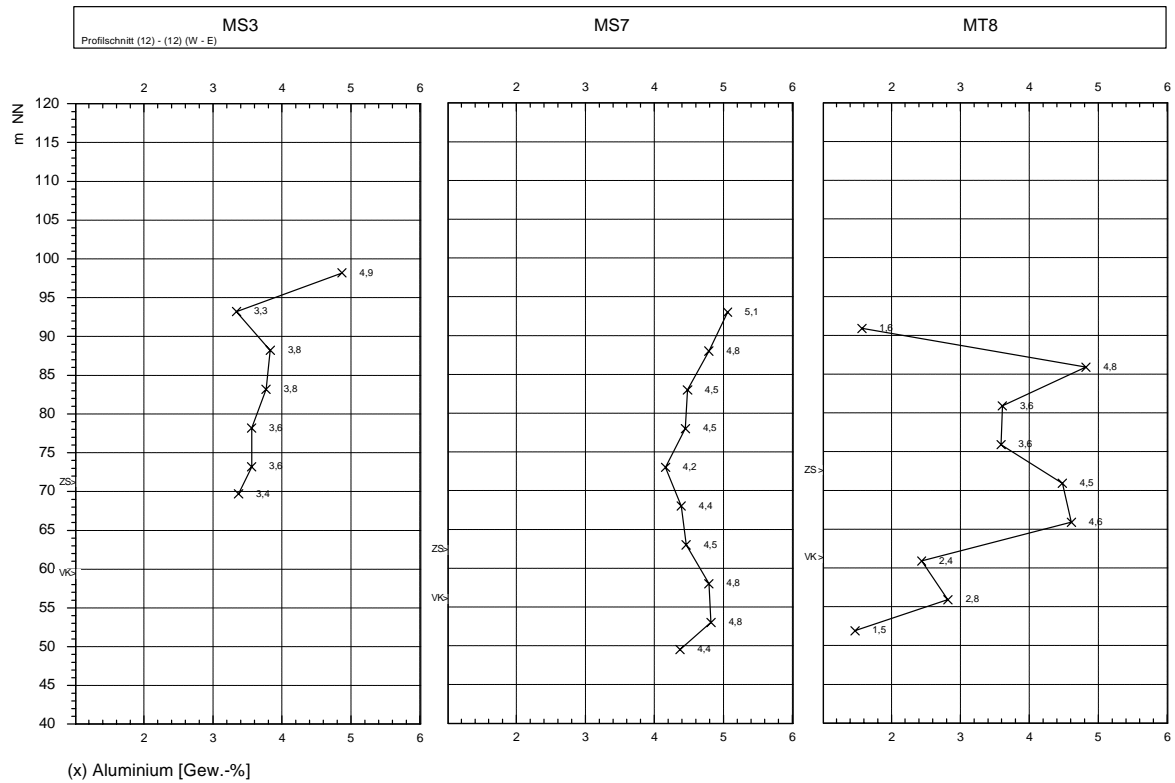


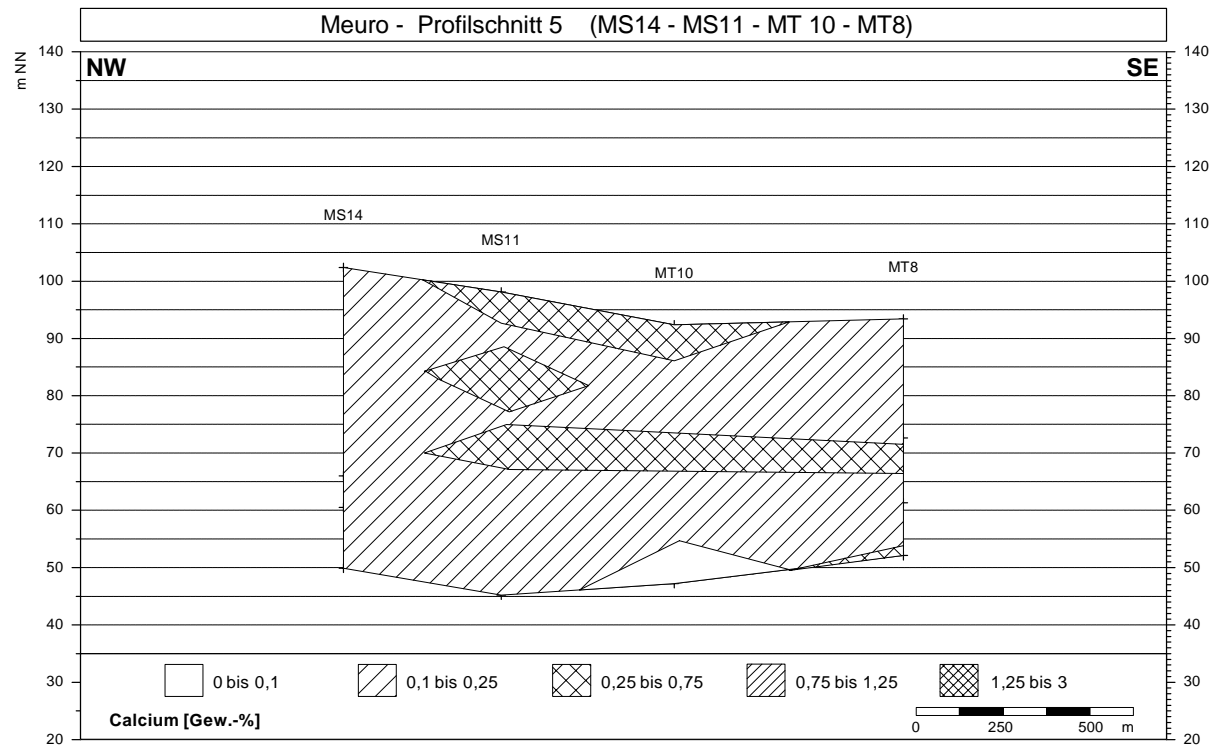
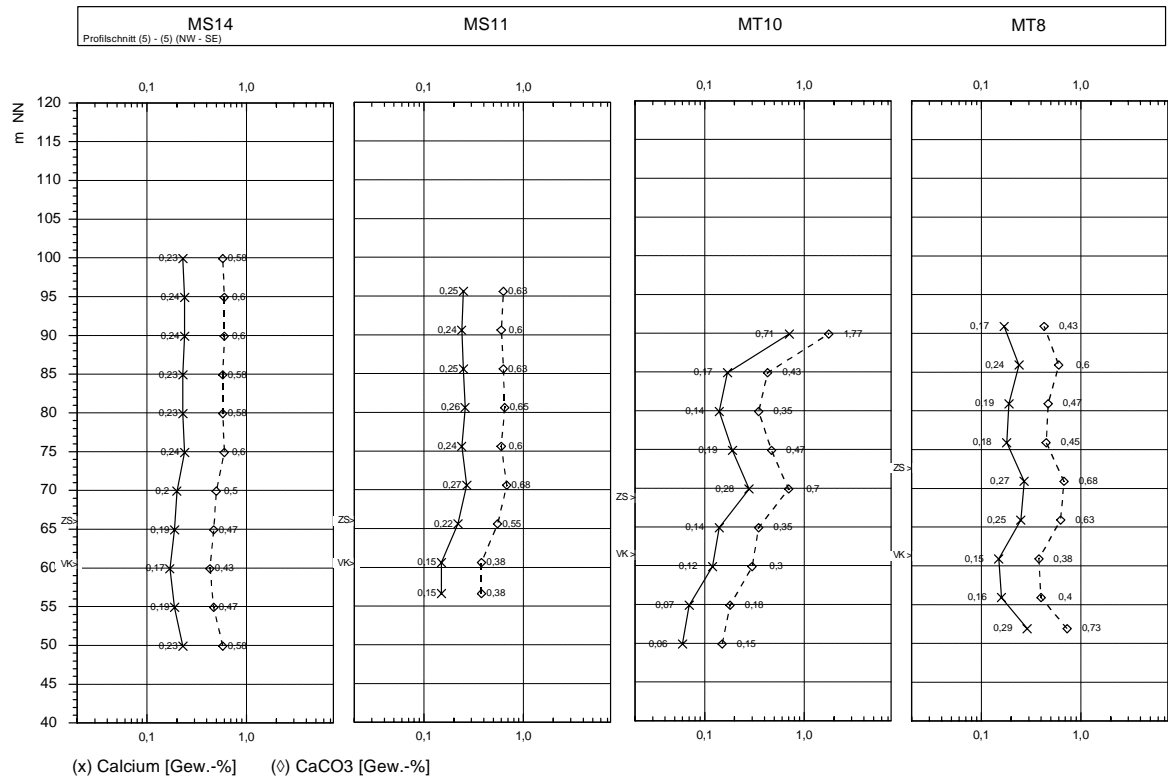


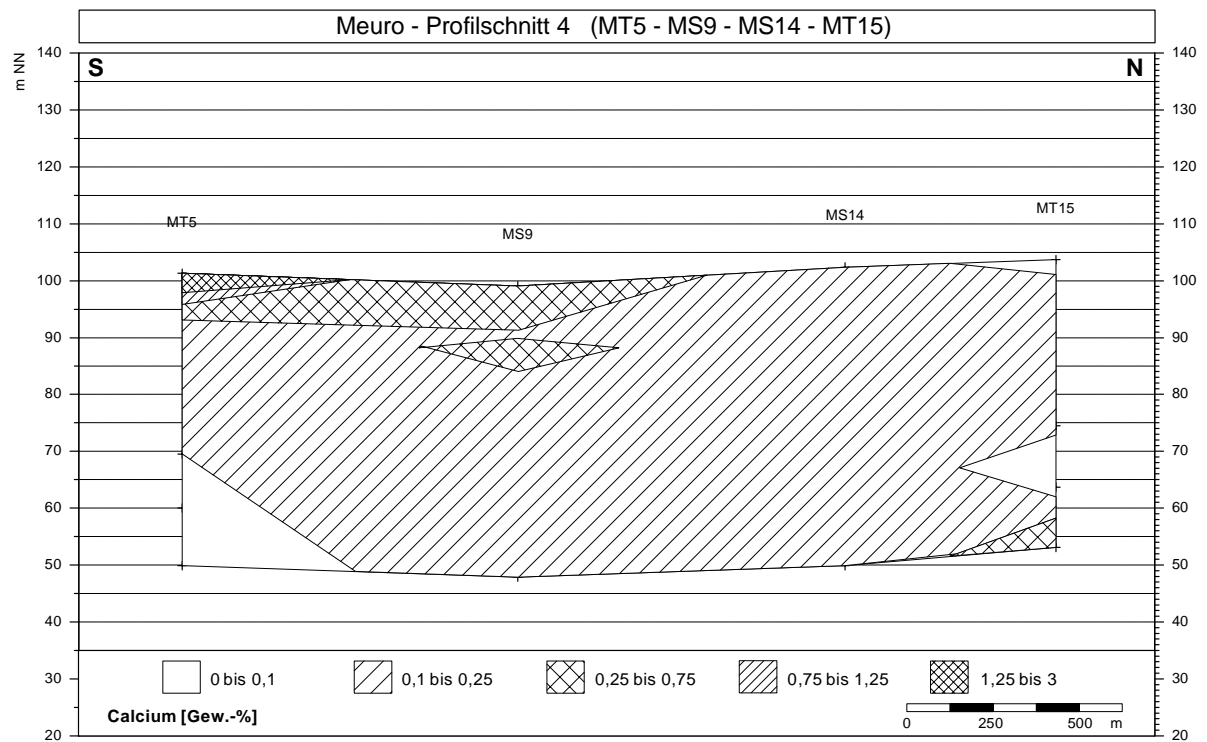
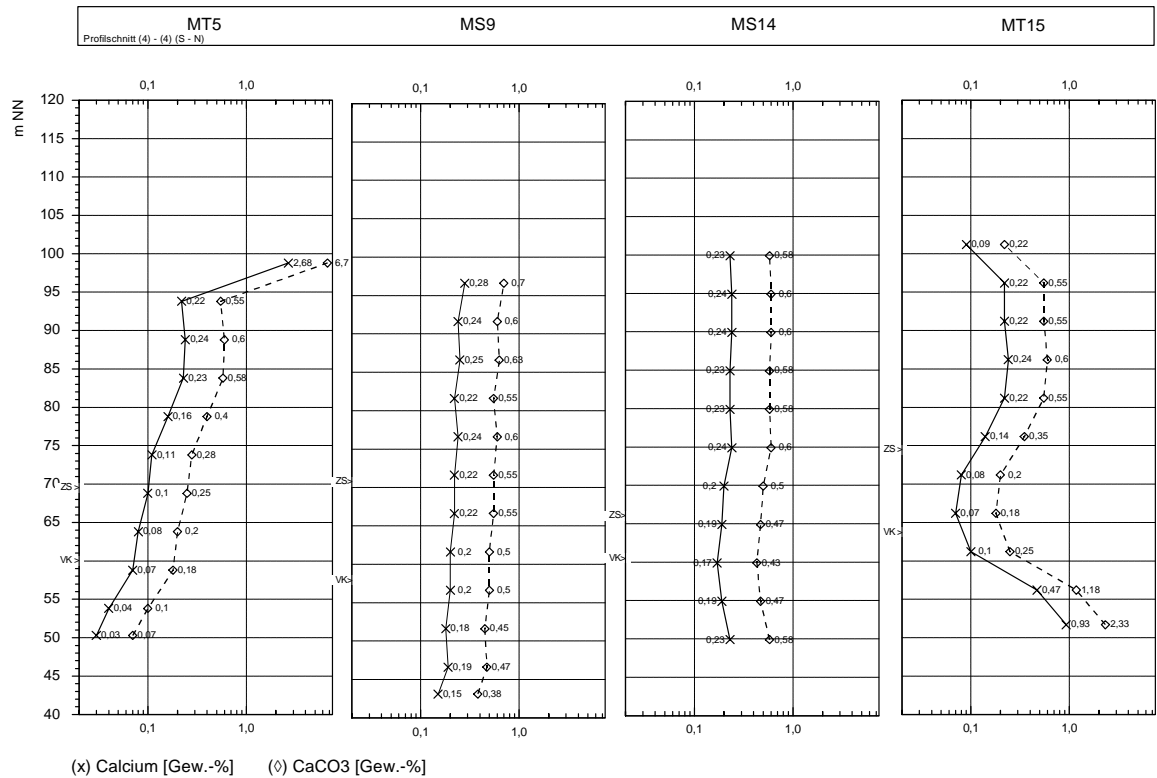


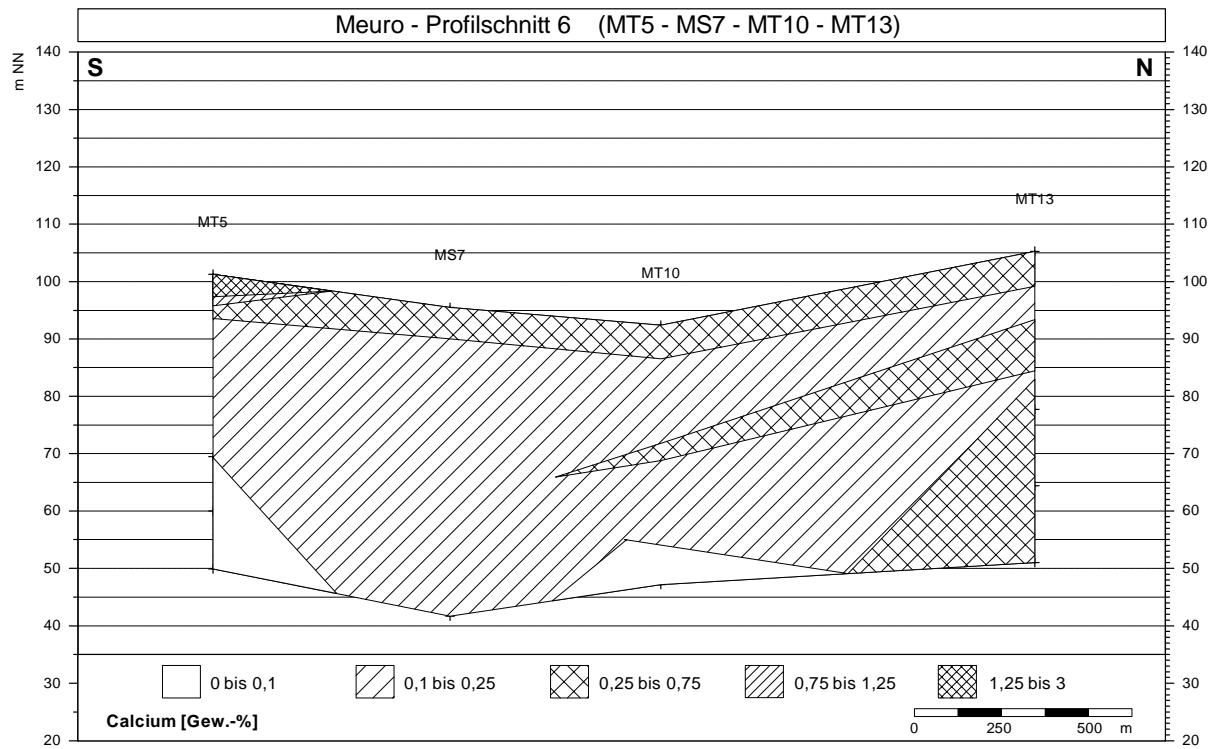
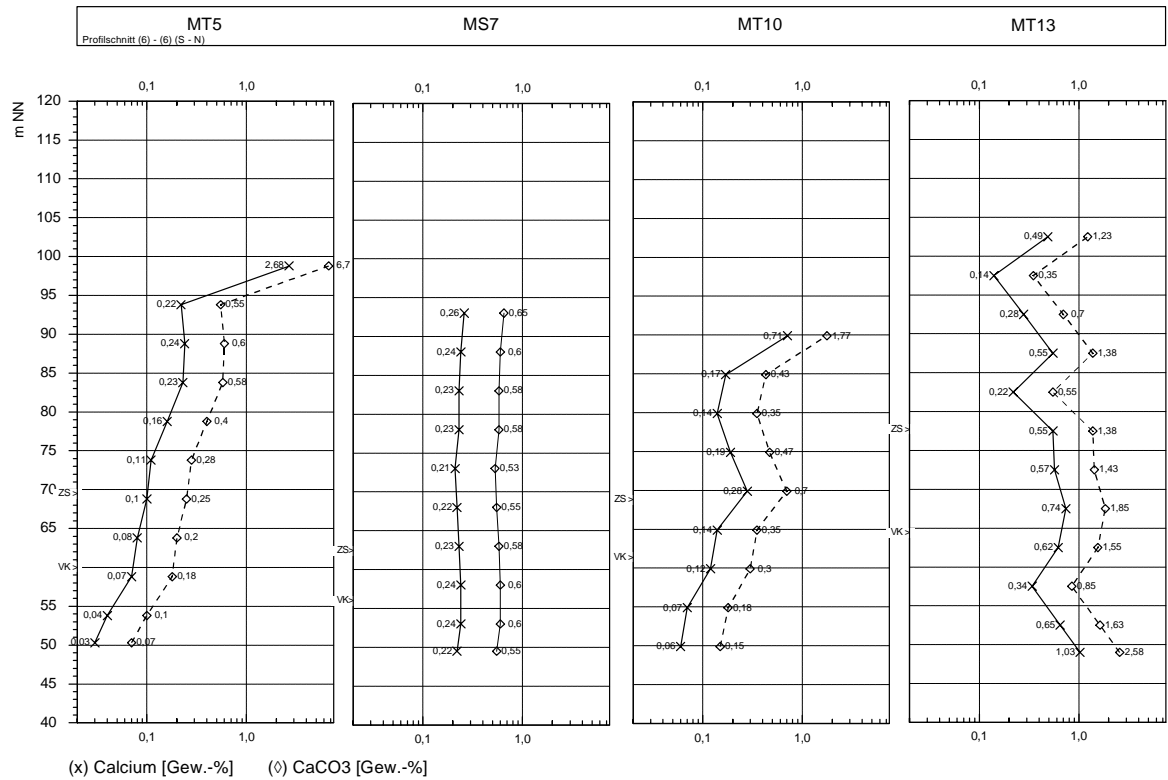


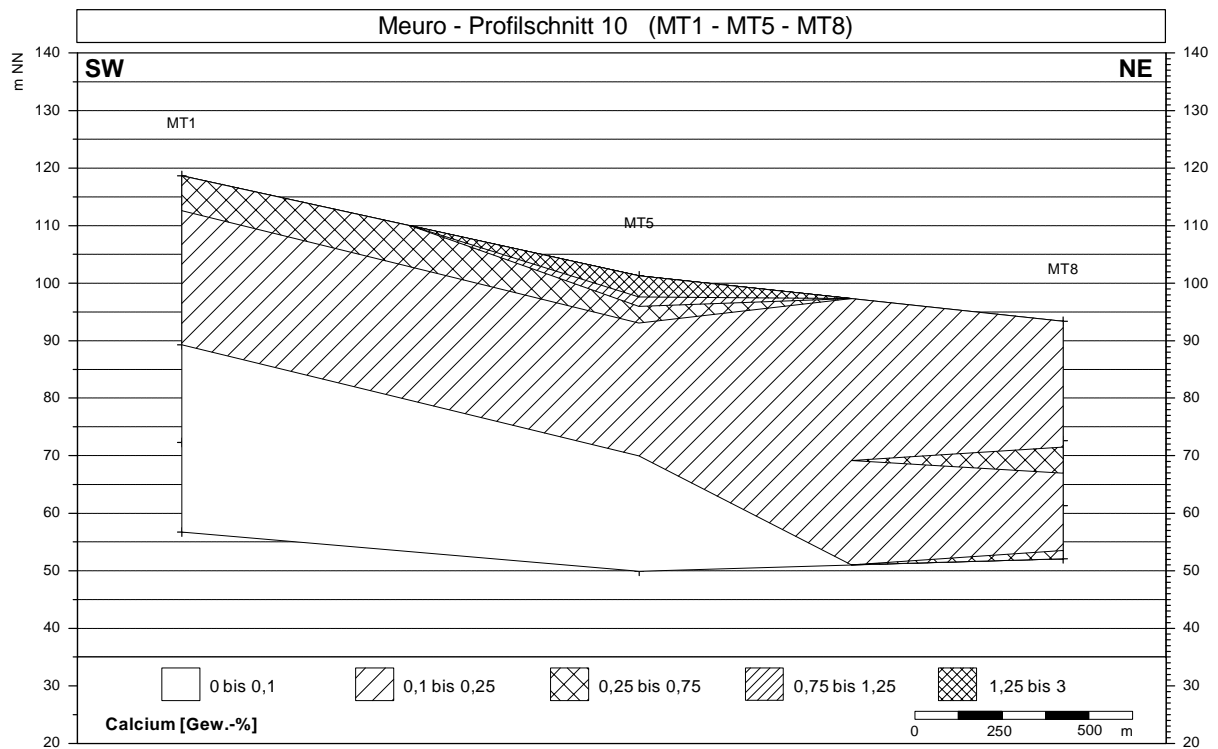
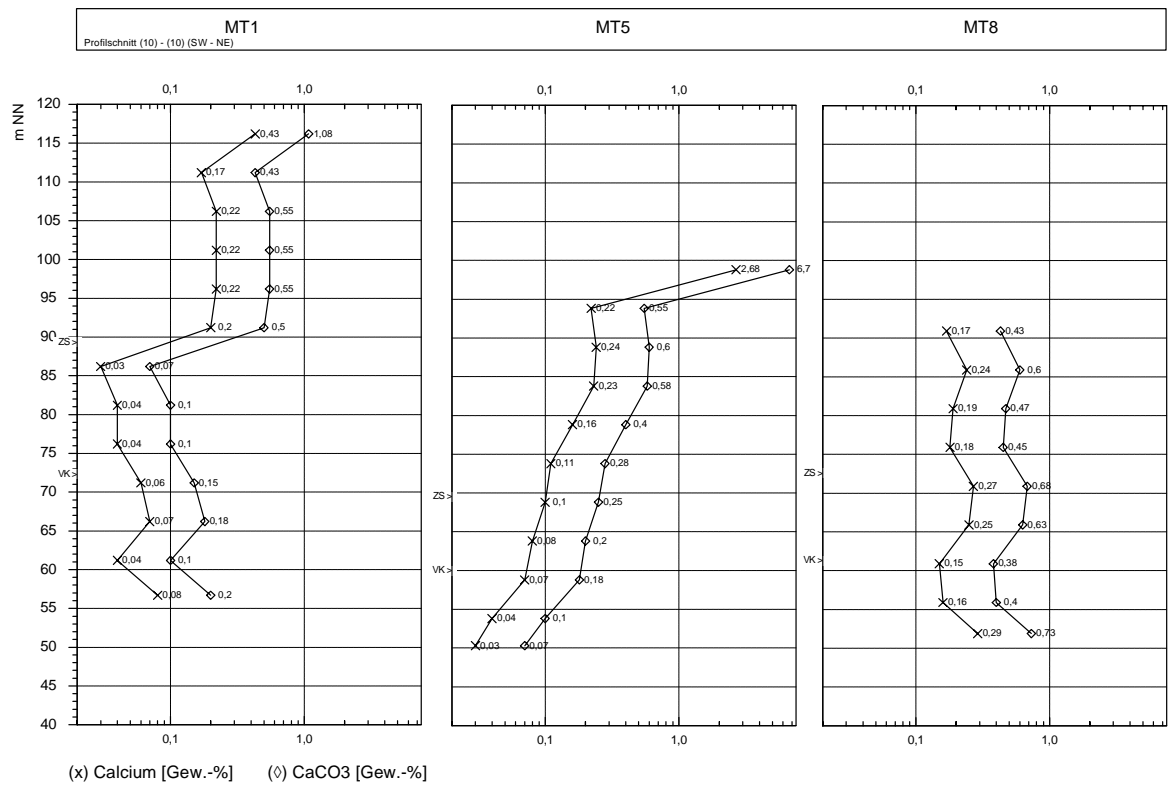


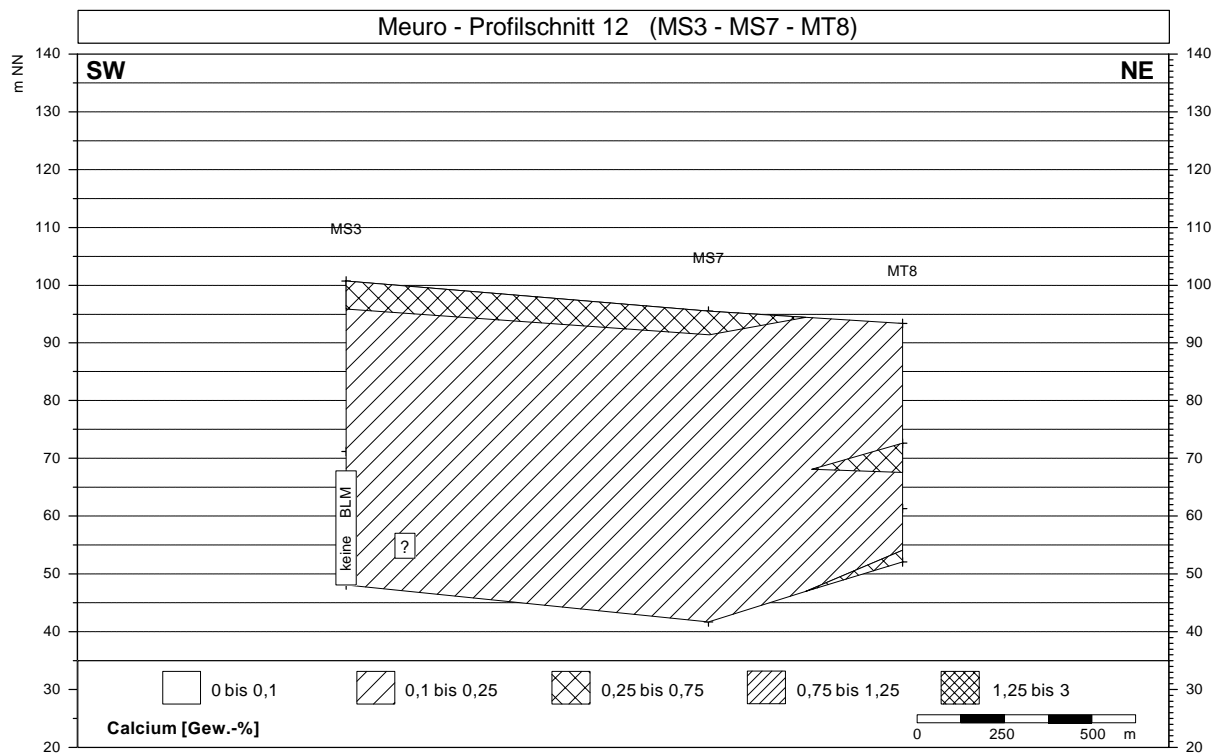
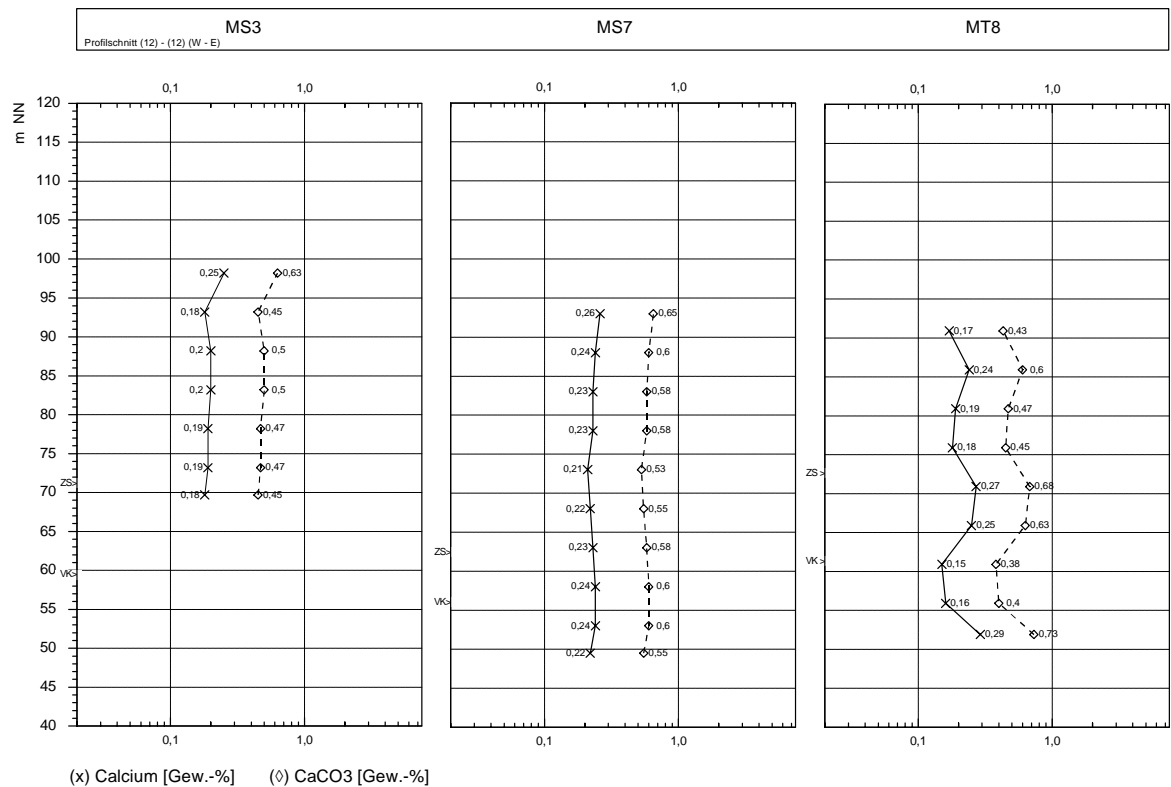


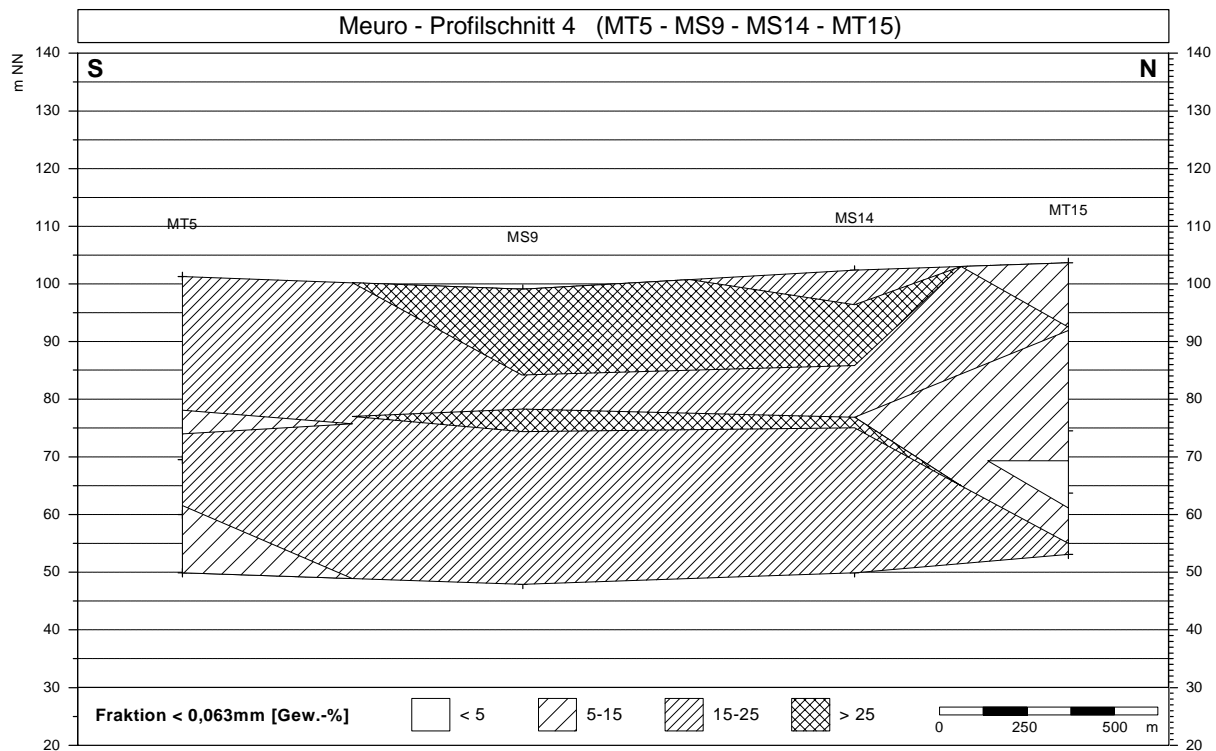
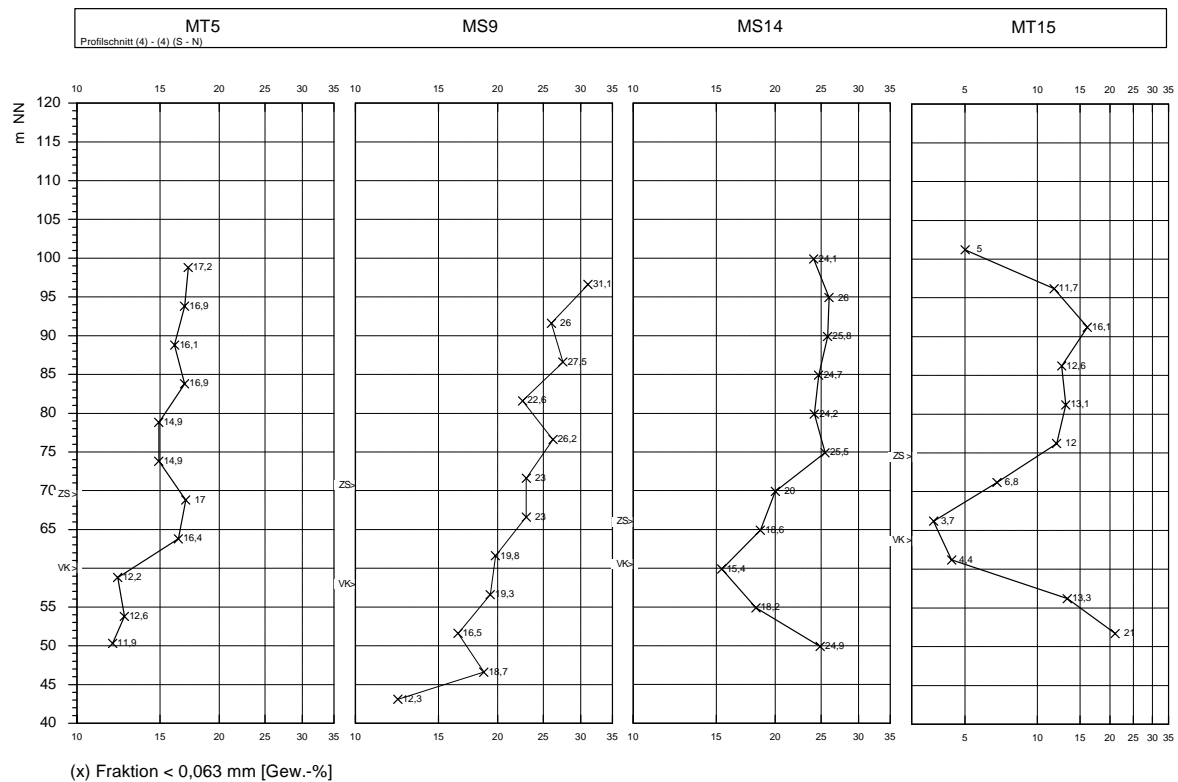


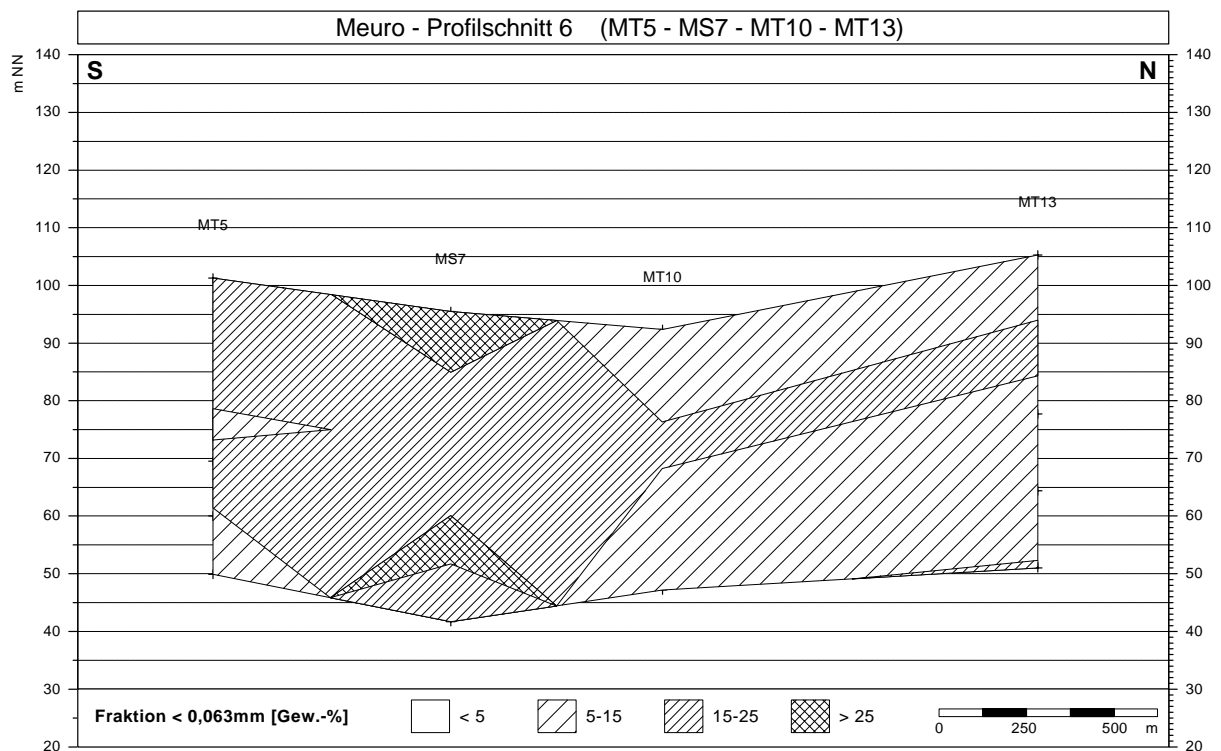
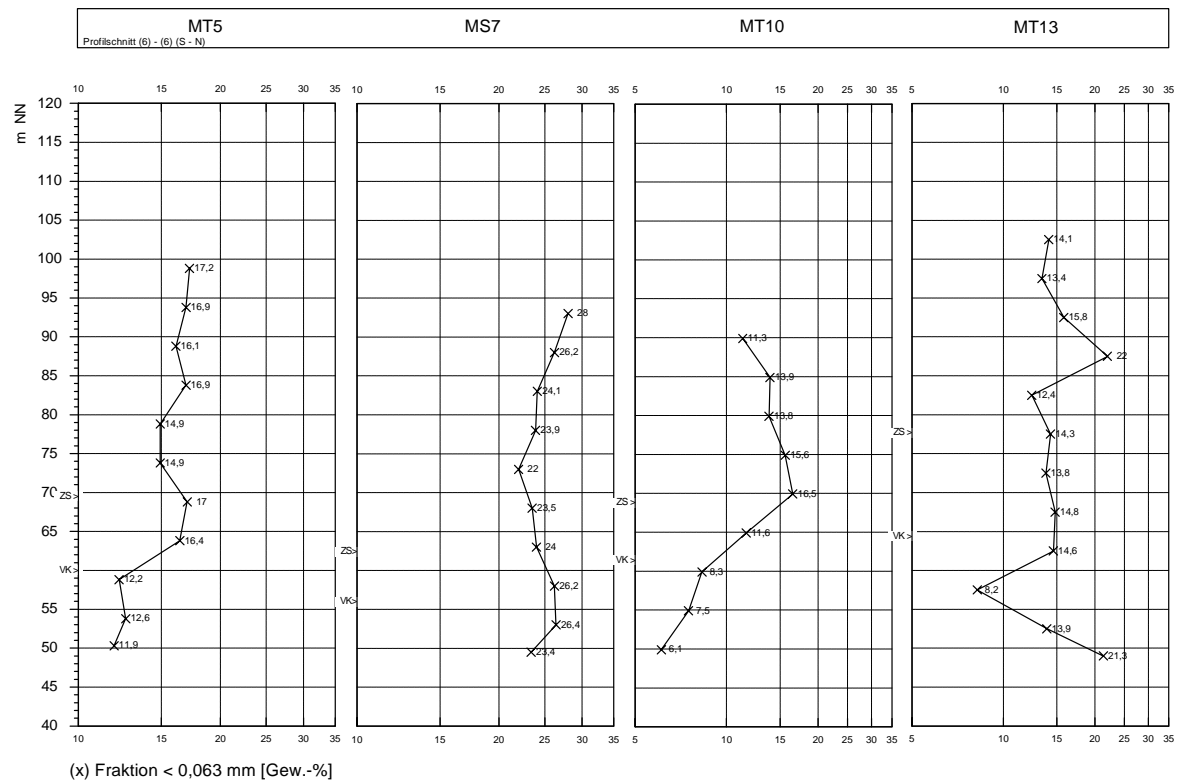


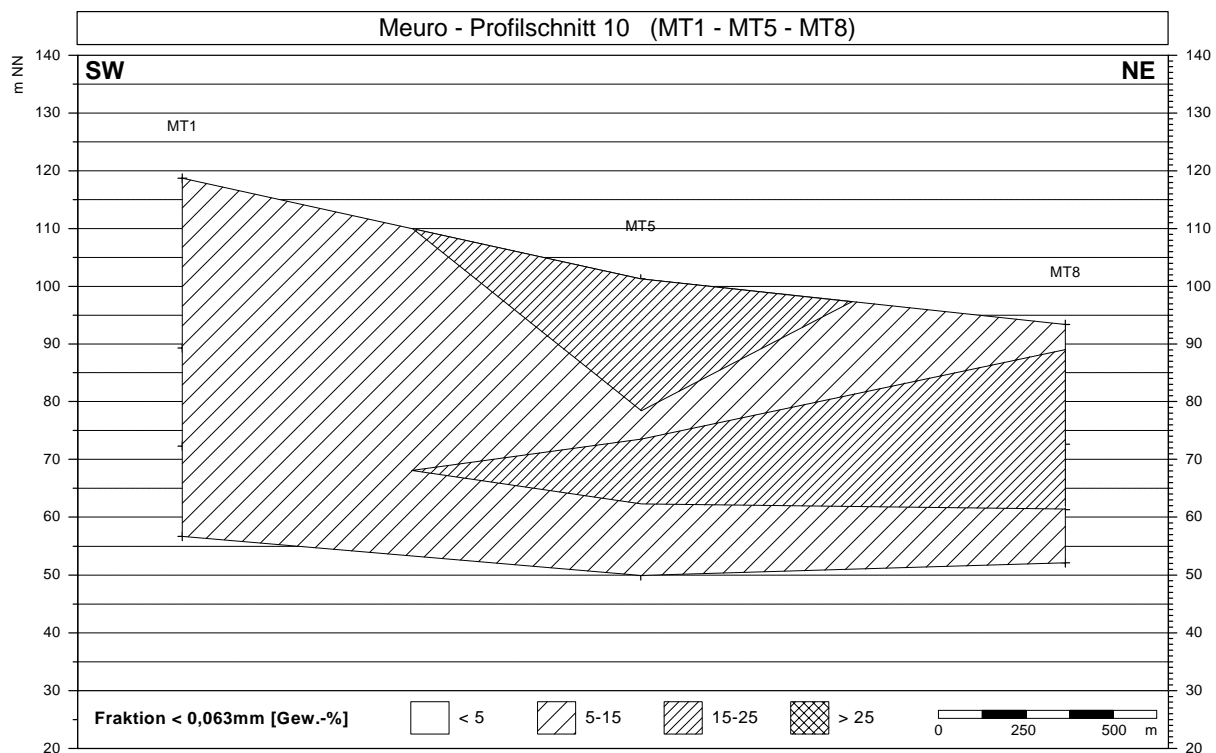
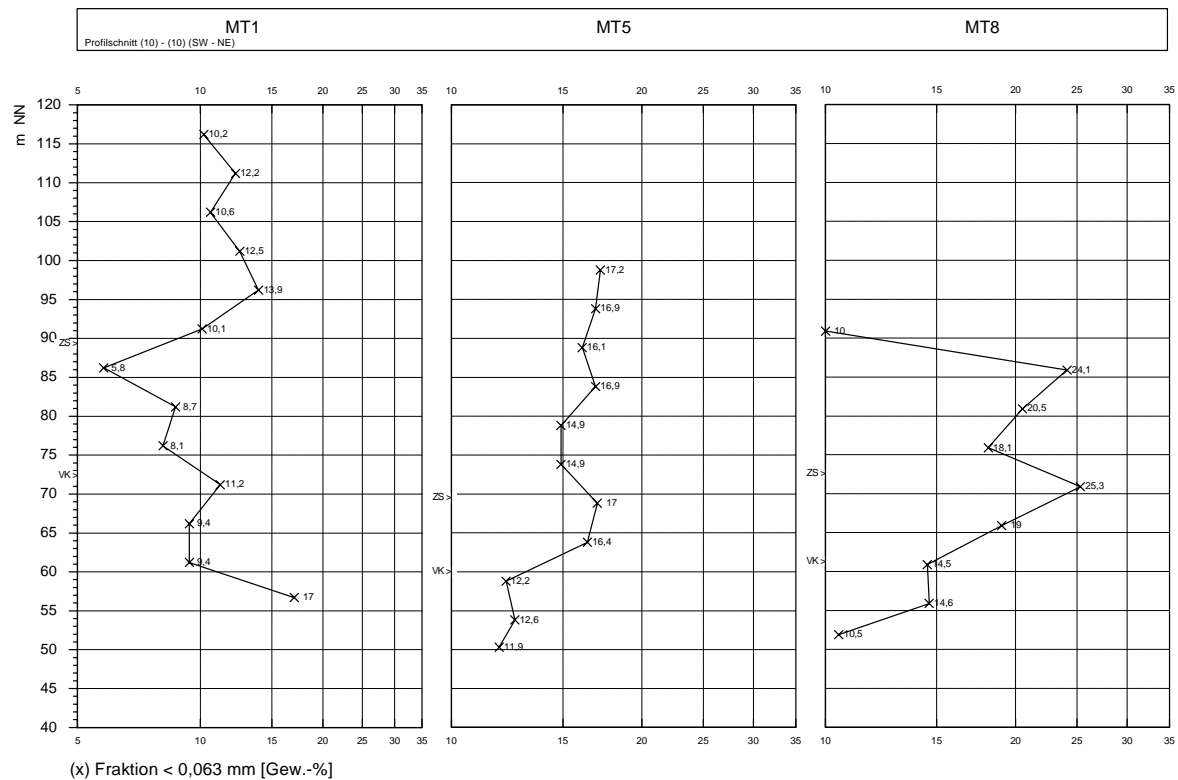


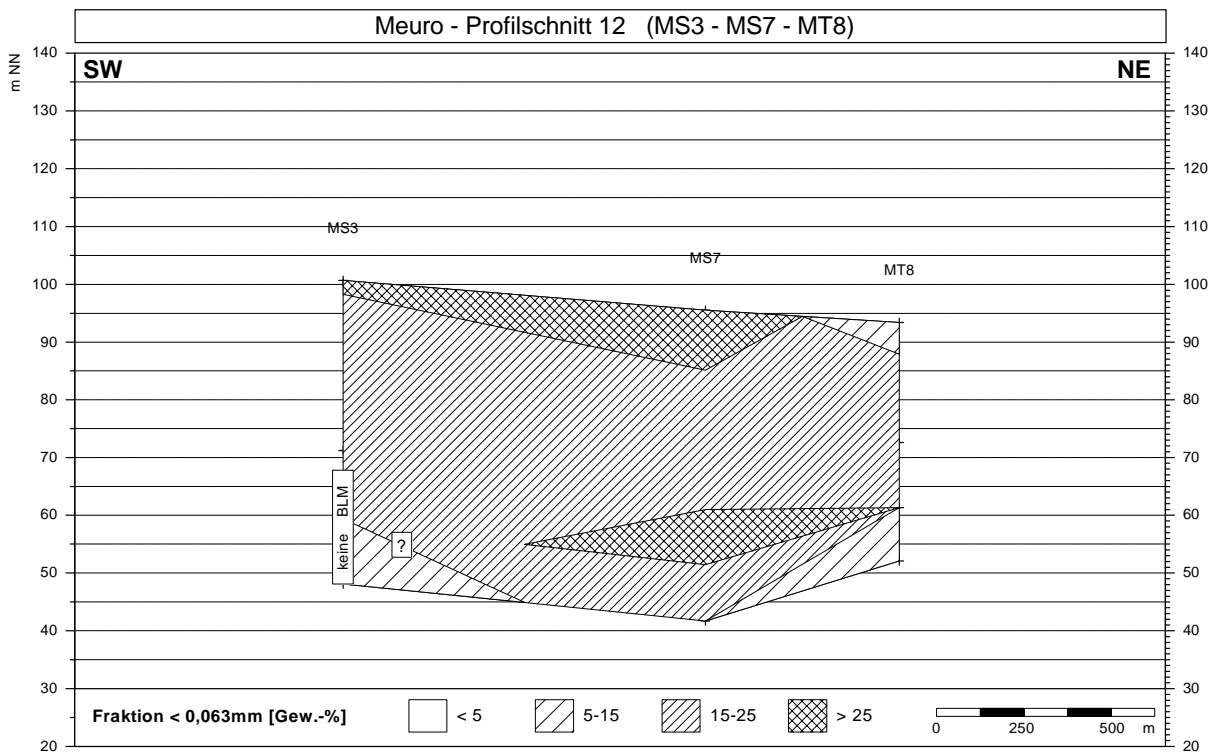
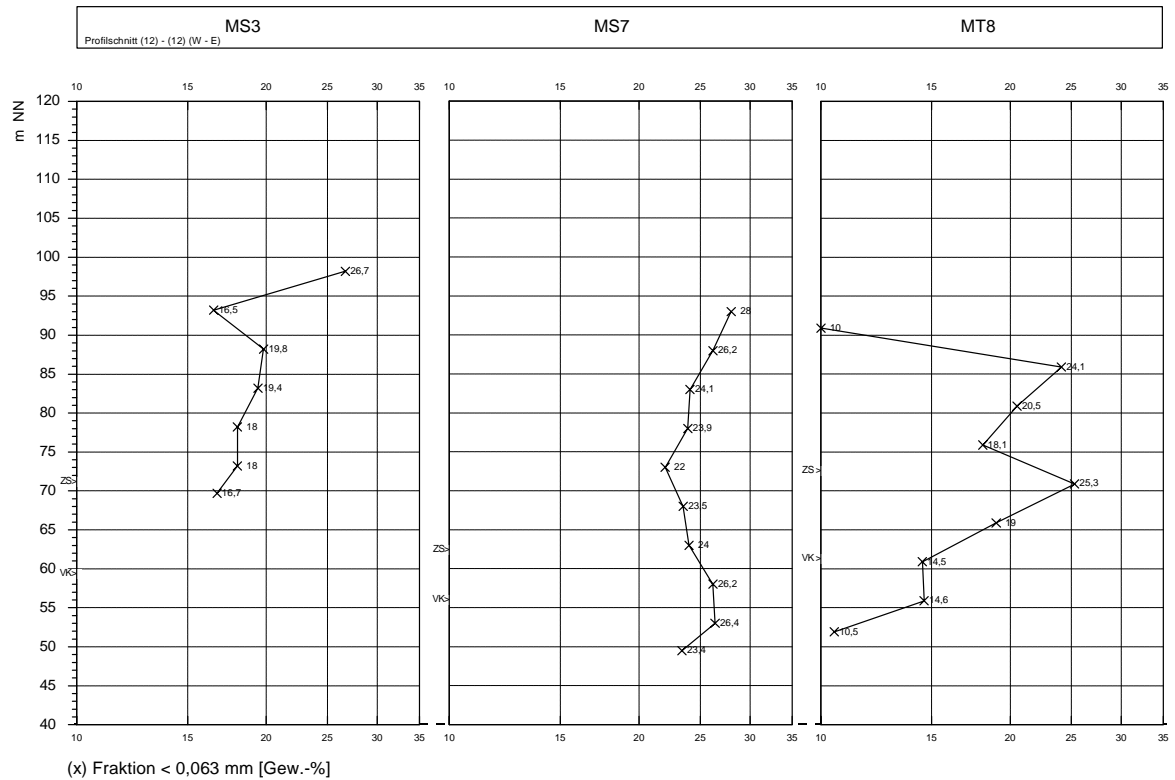




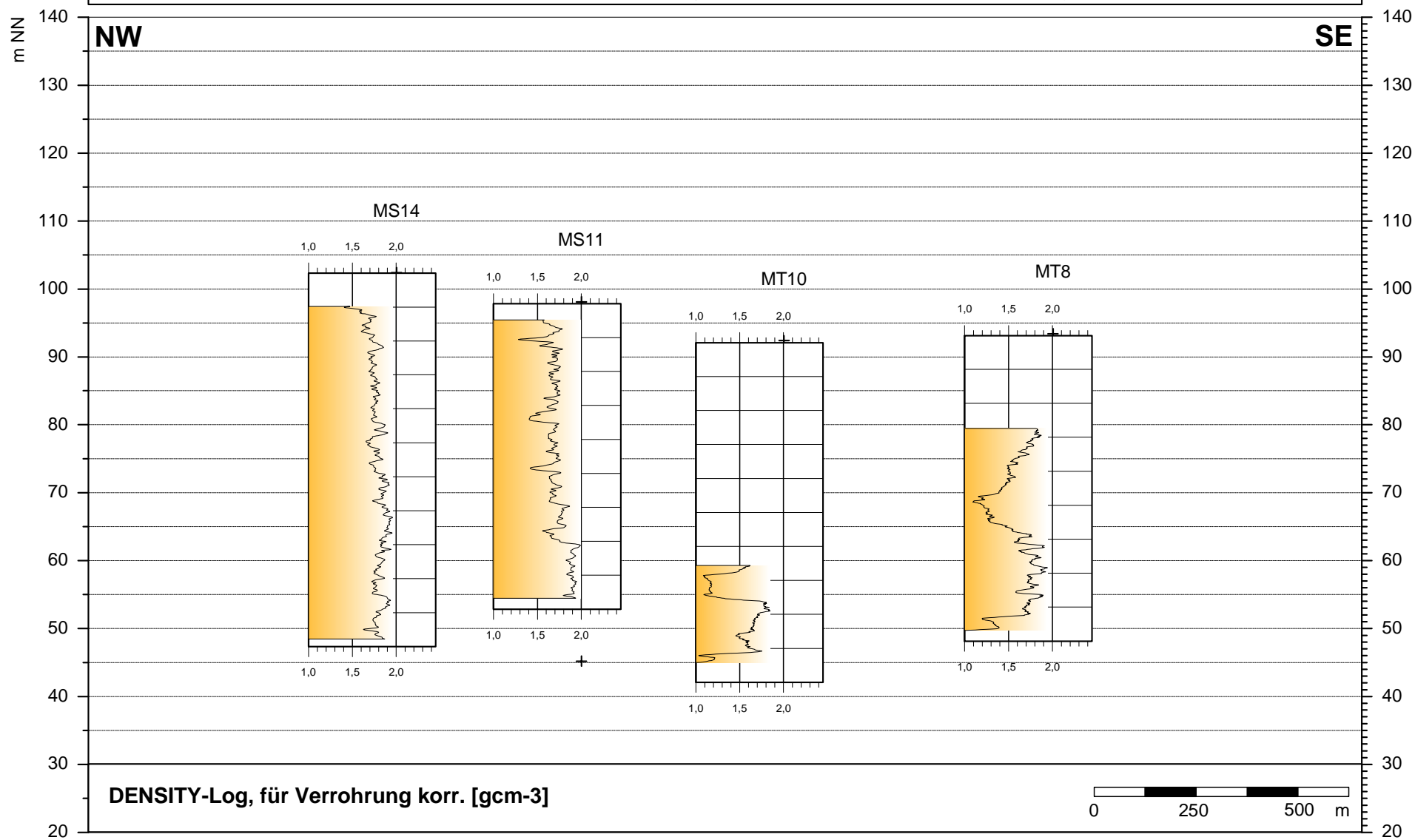




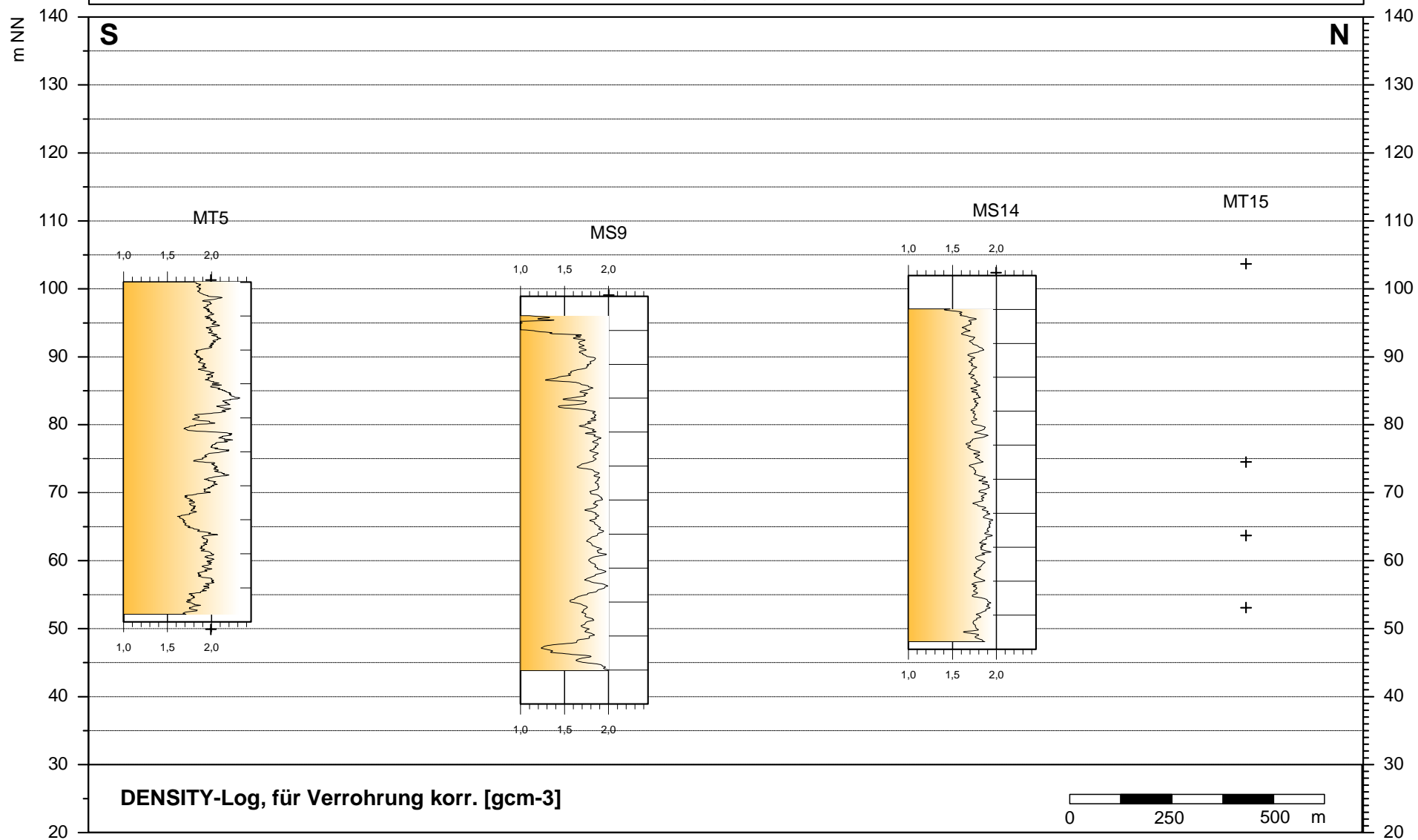




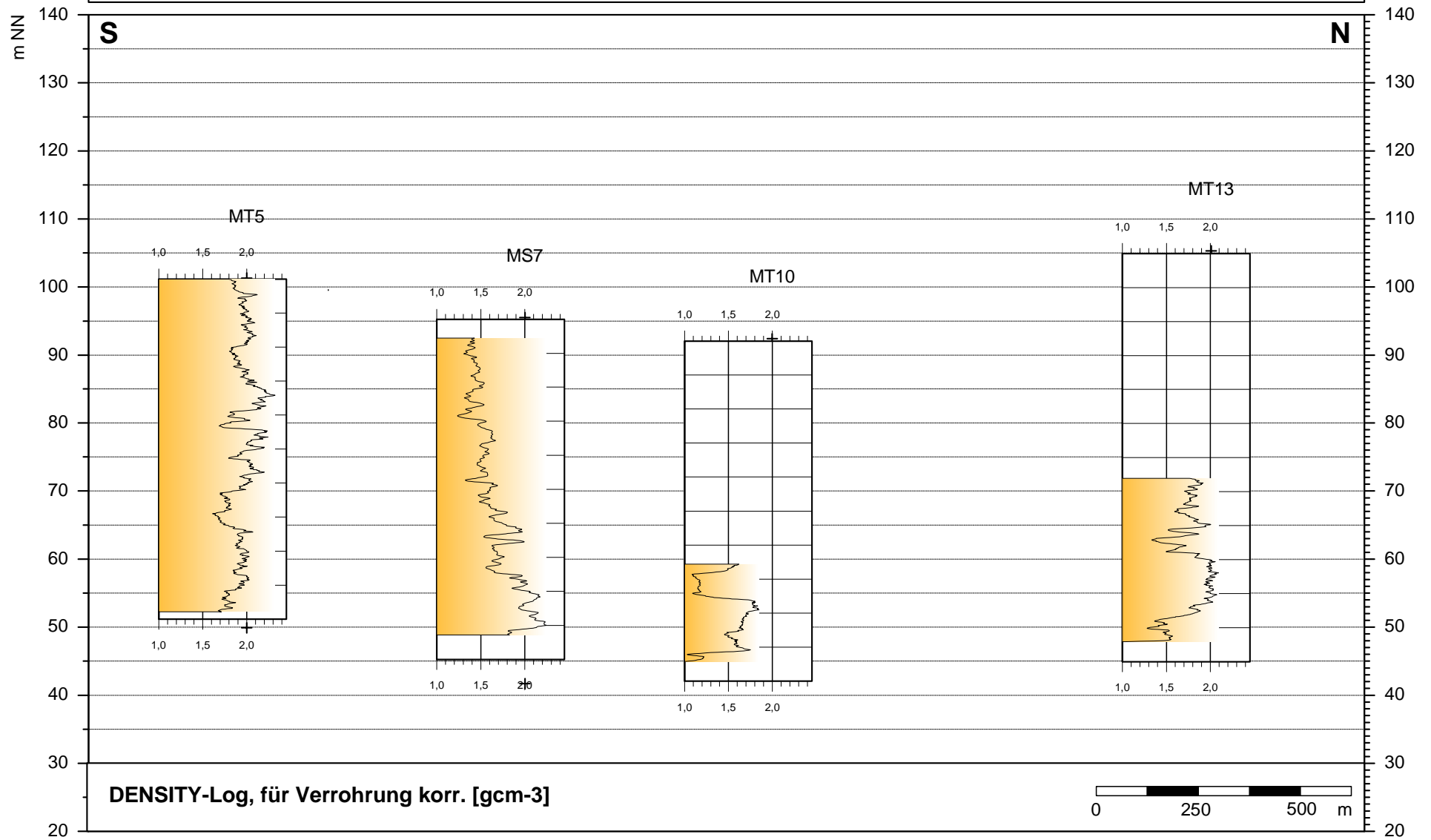
Meuro - Profilschnitt 5 (MS14 - MS11 - MT 10 - MT8)



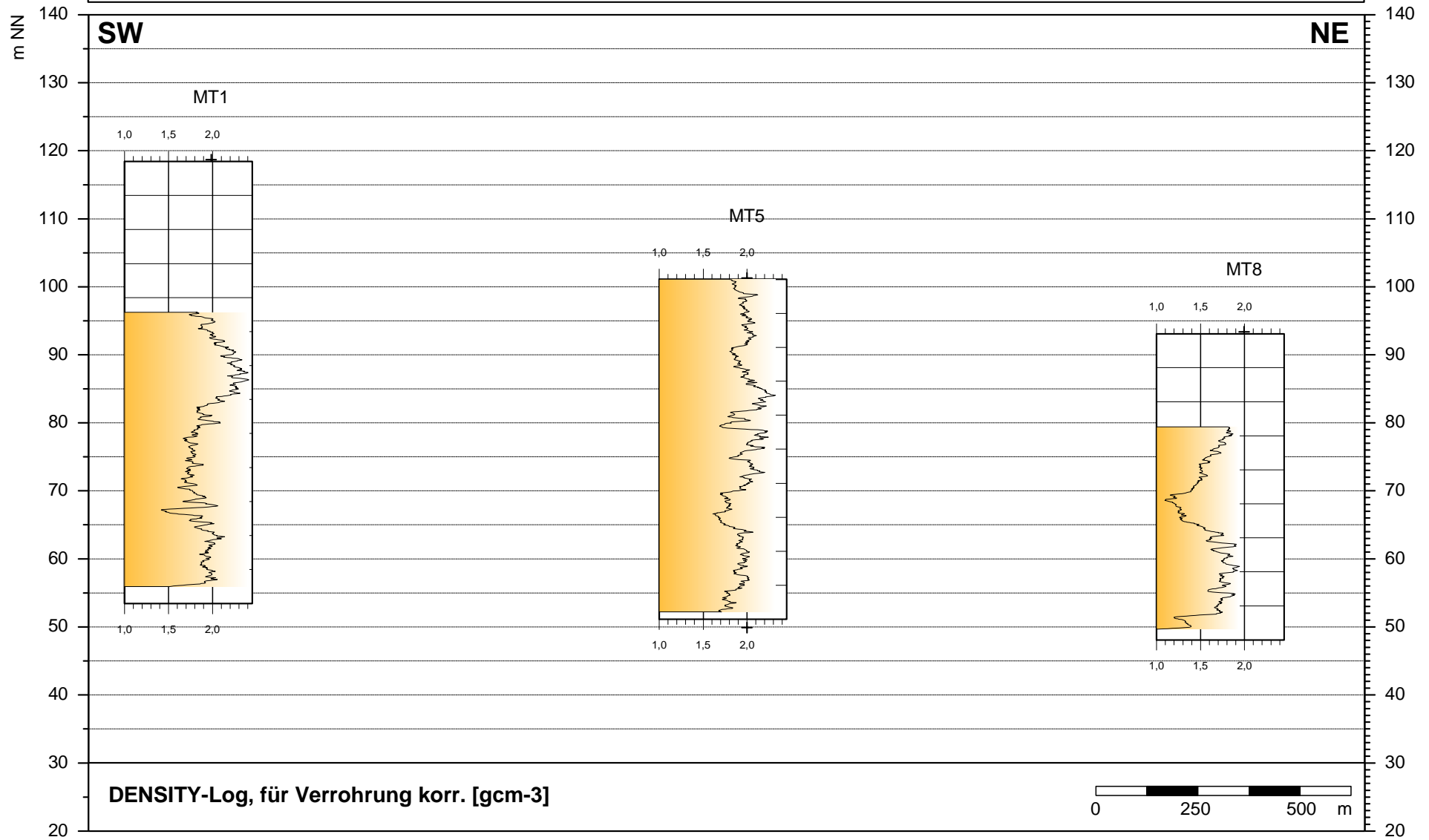
Meuro - Profilschnitt 4 (MT5 - MS9 - MS14 - MT15)



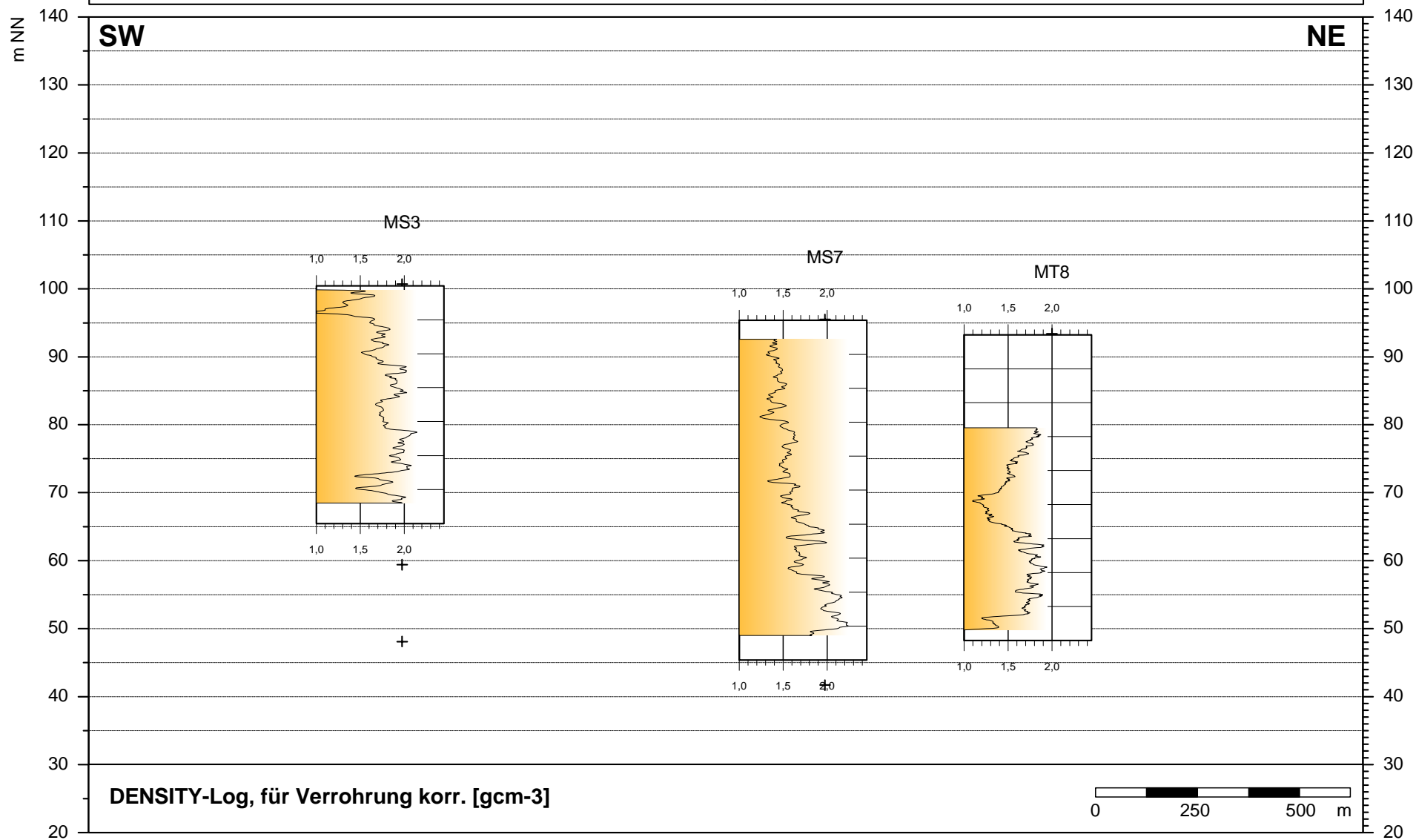
Meuro - Profilschnitt 6 (MT5 - MS7 - MT10 - MT13)



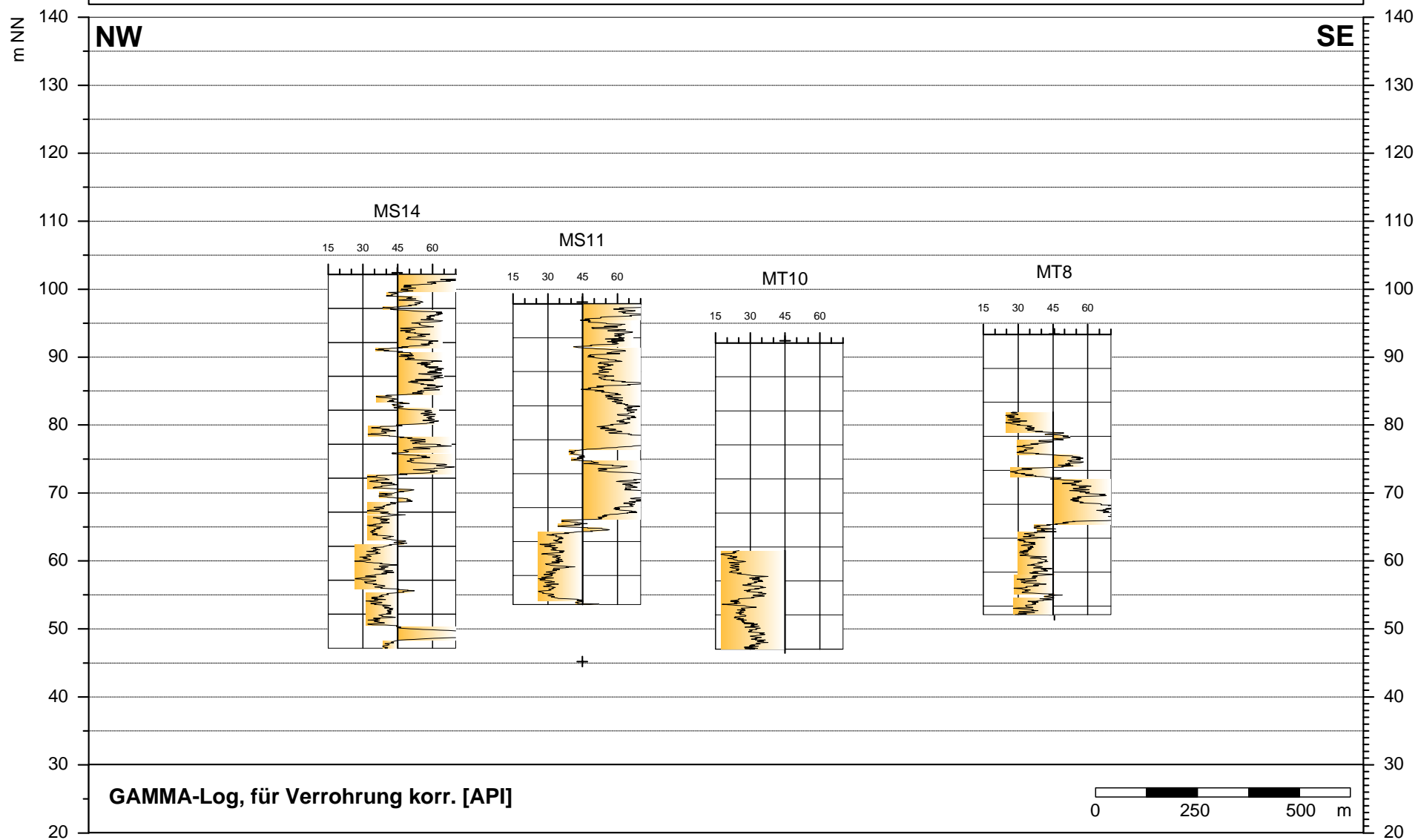
Meuro - Profilschnitt 10 (MT1 - MT5 - MT8)



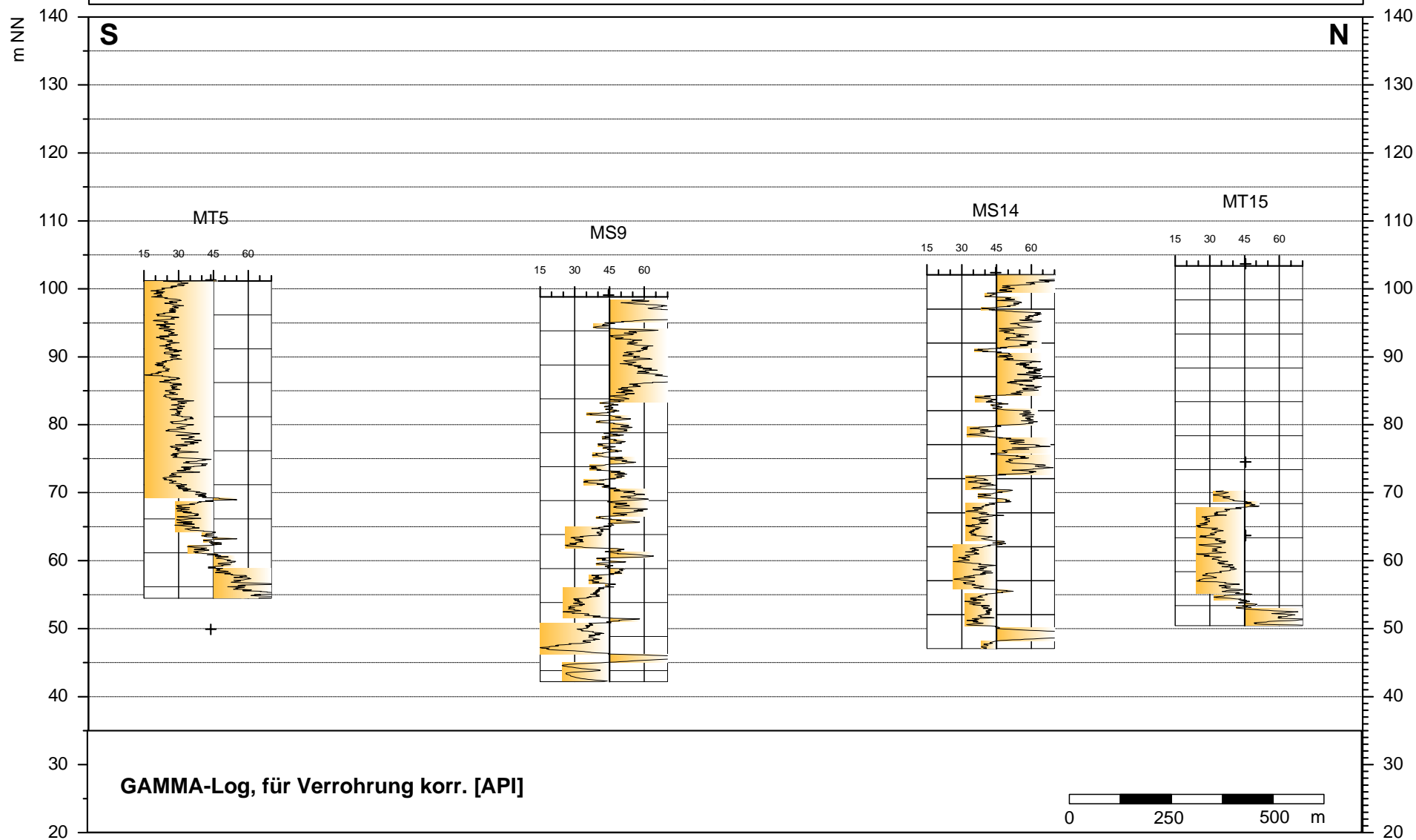
Meuro - Profilschnitt 12 (MS3 - MS7 - MT8)



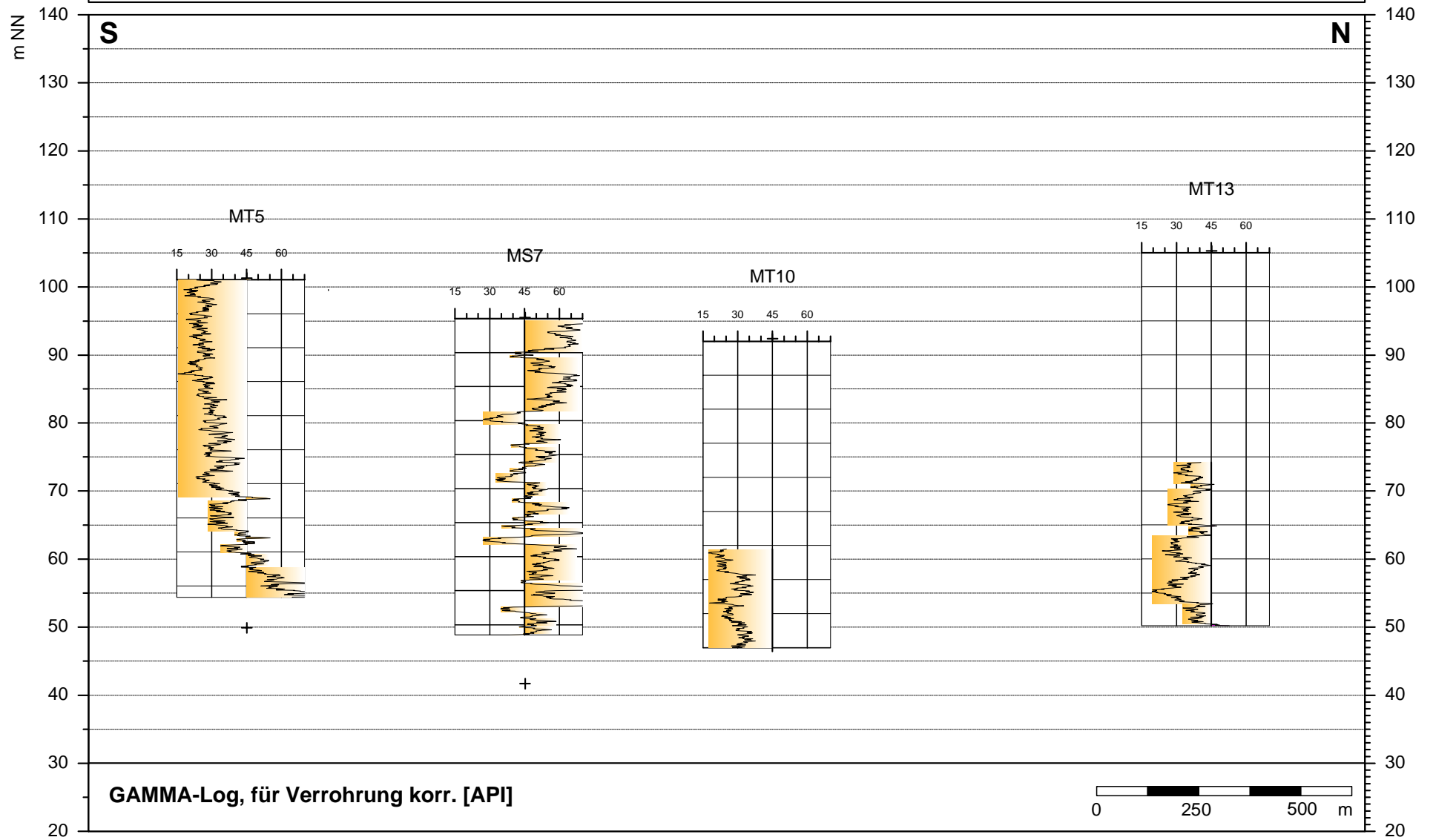
Meuro - Profilschnitt 5 (MS14 - MS11 - MT 10 - MT8)



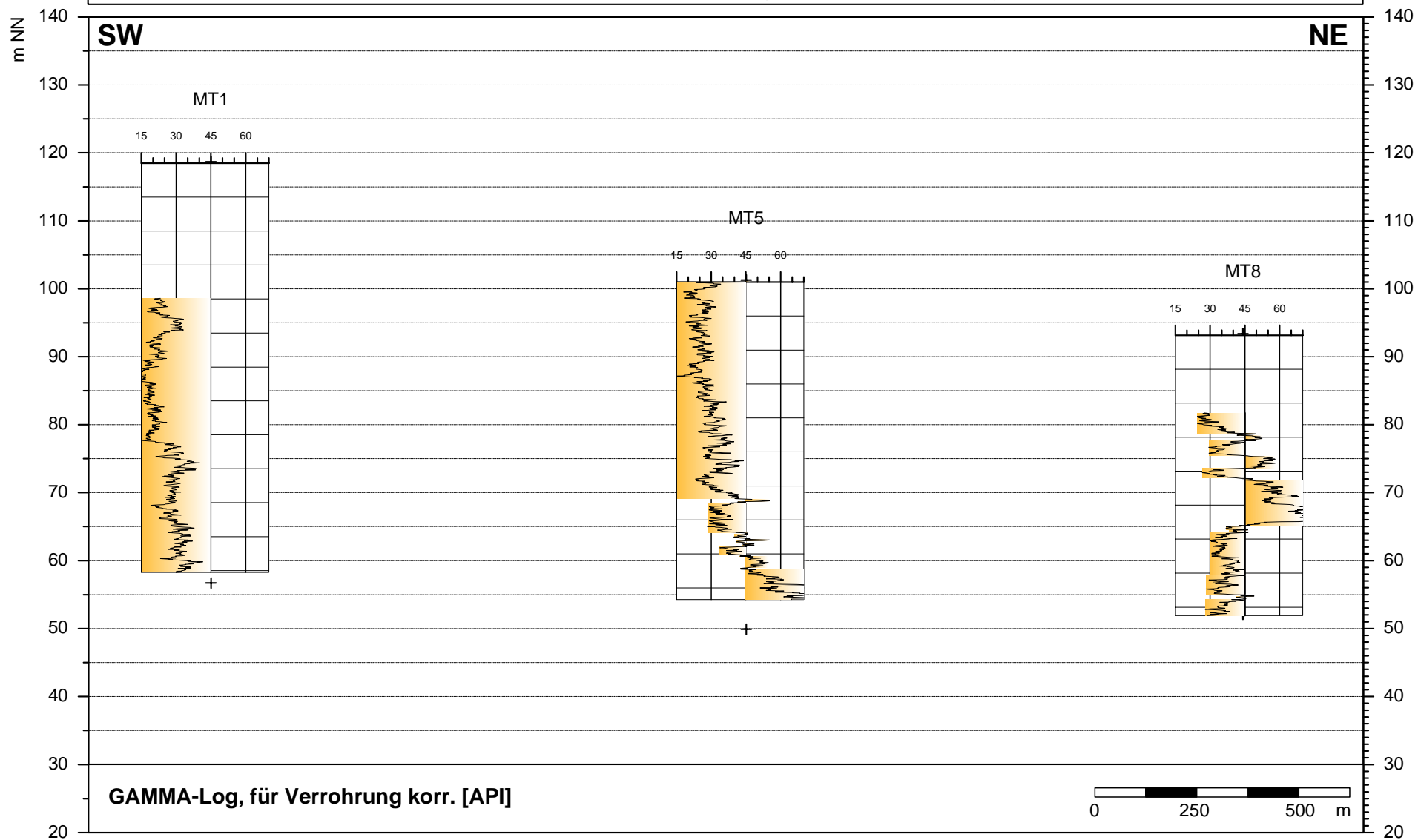
Meuro - Profilschnitt 4 (MT5 - MS9 - MS14 - MT15)



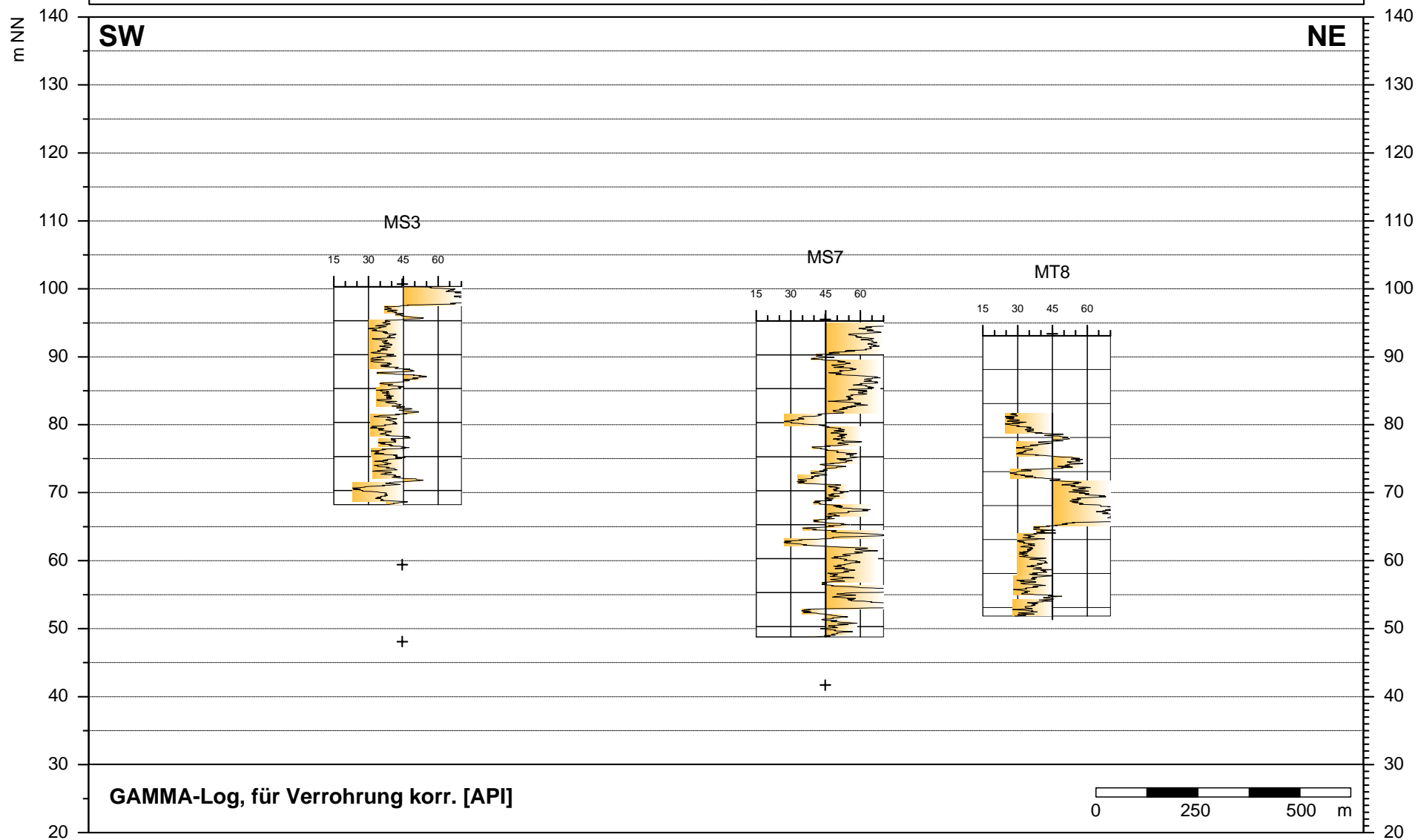
Meuro - Profilschnitt 6 (MT5 - MS7 - MT10 - MT13)

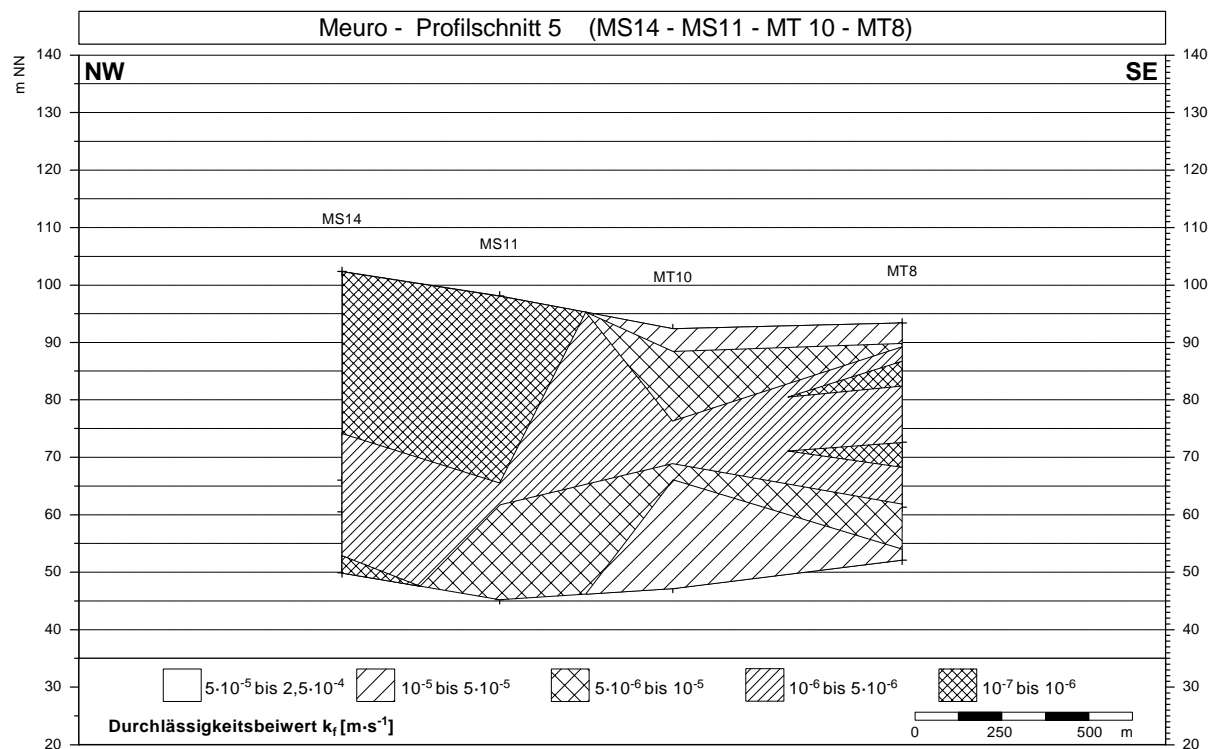
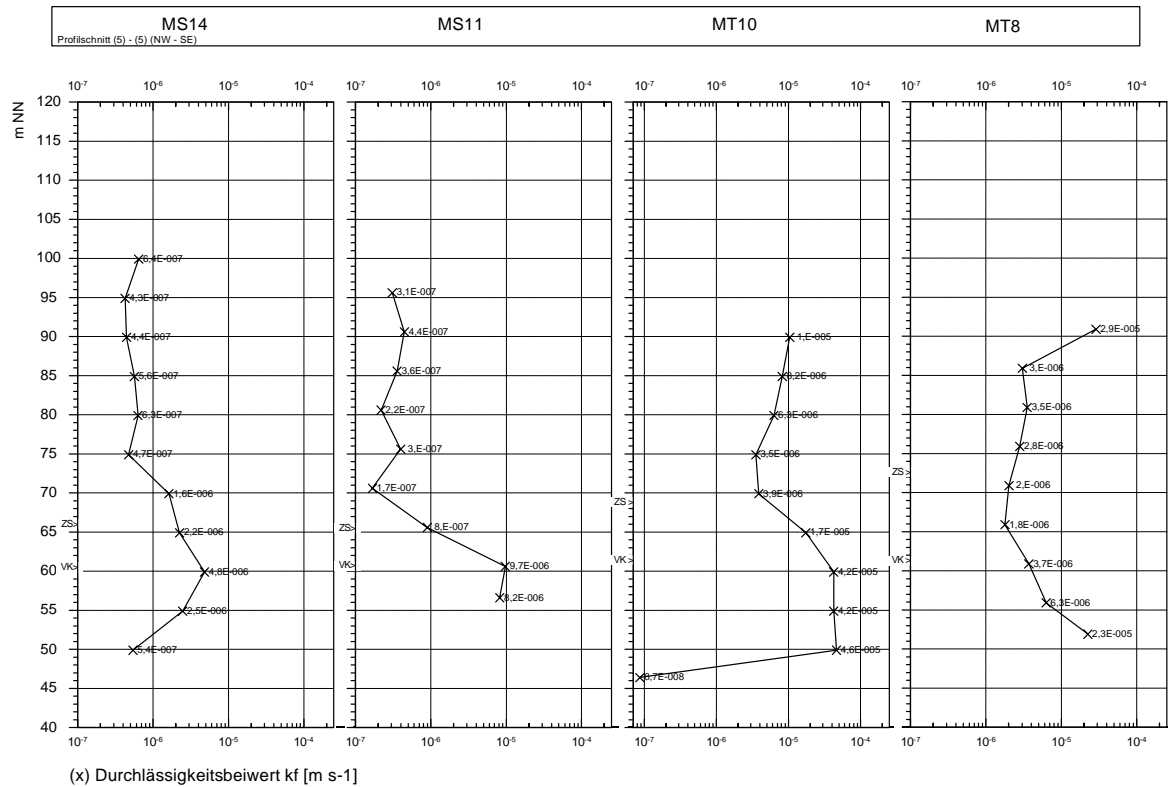


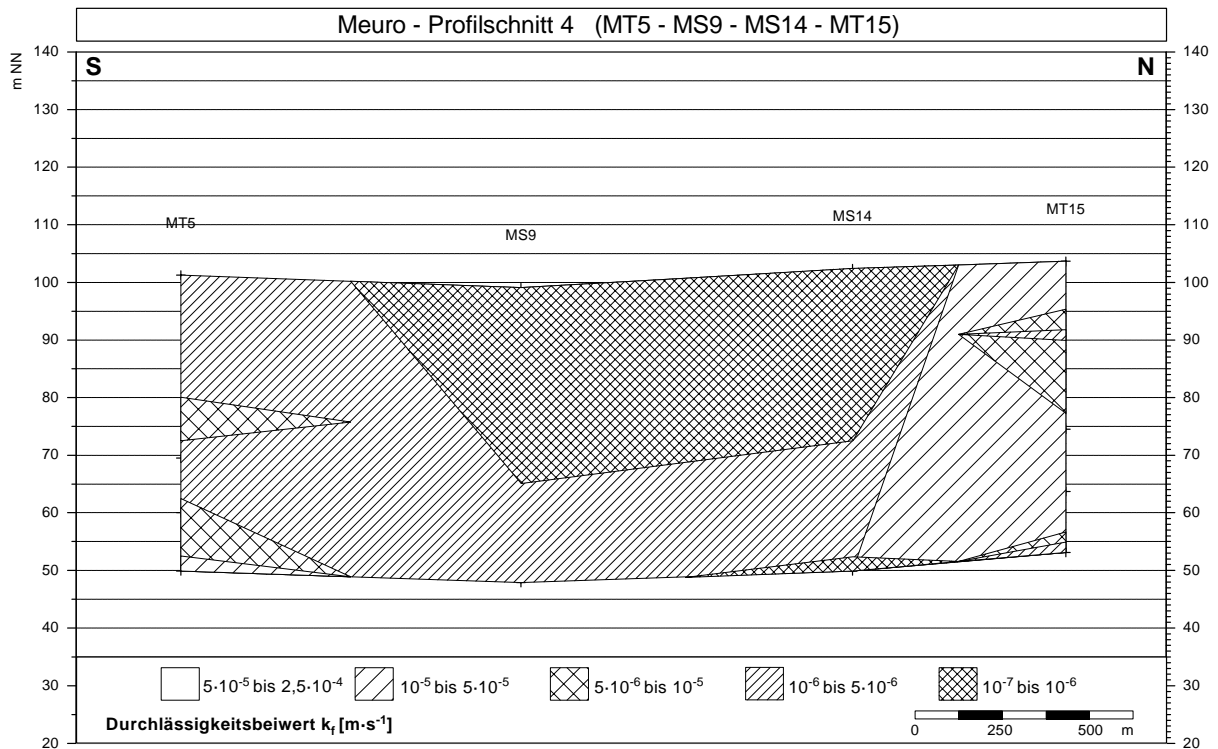
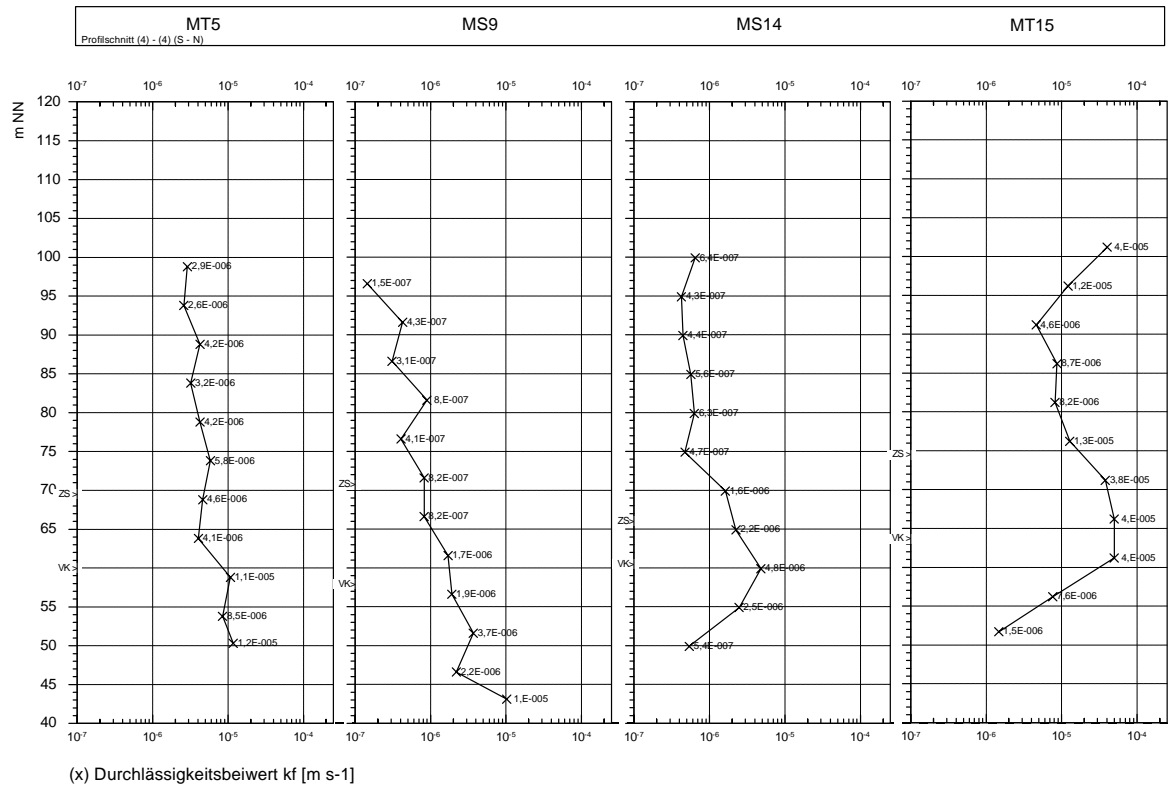
Meuro - Profilschnitt 10 (MT1 - MT5 - MT8)

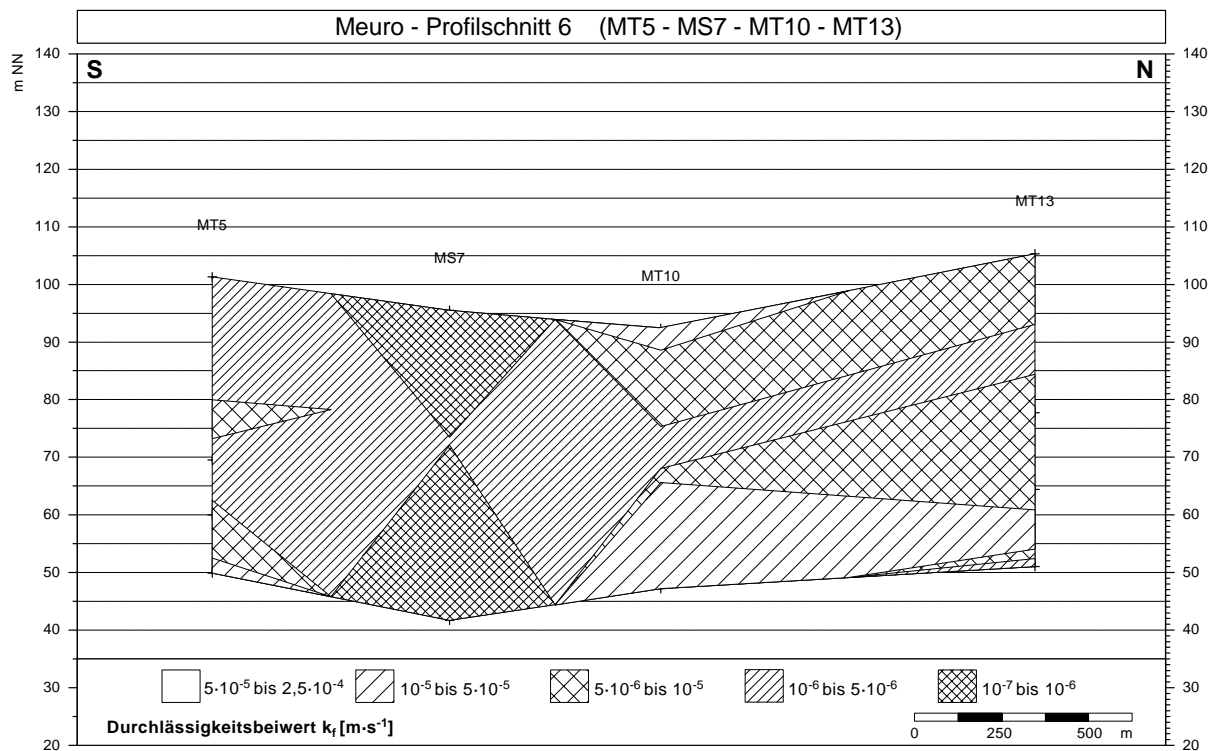
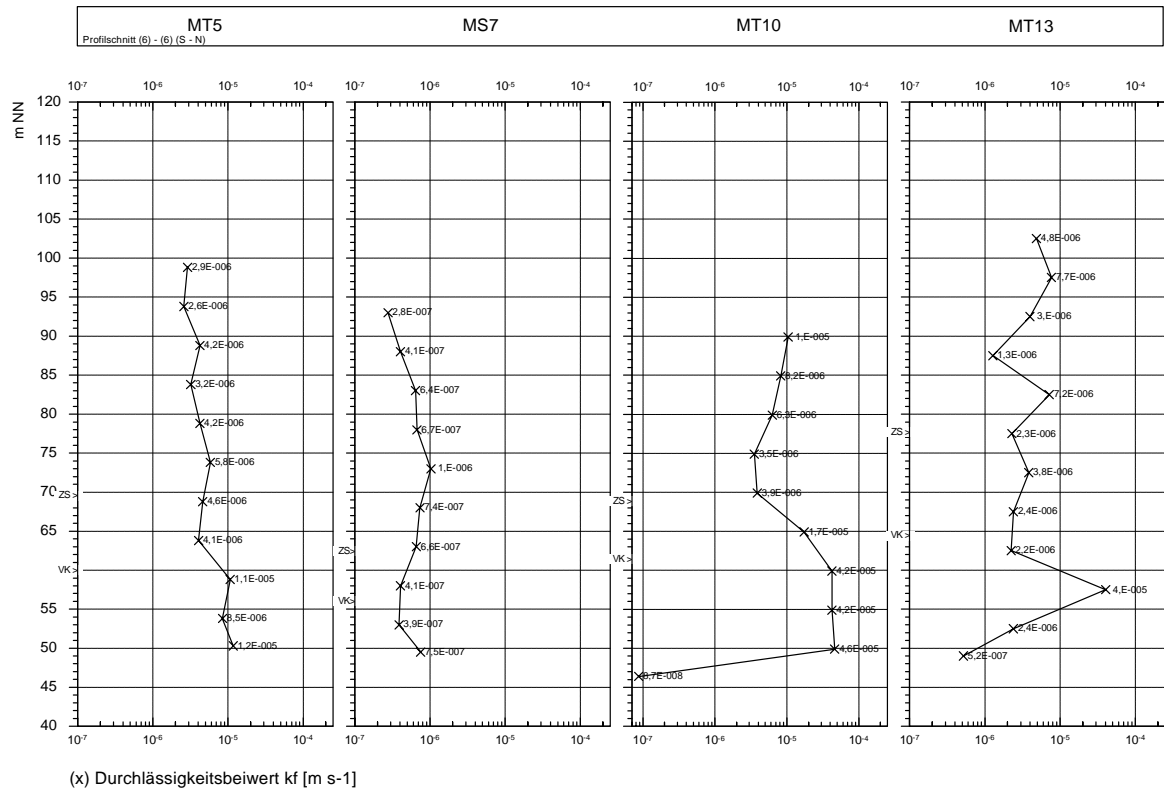


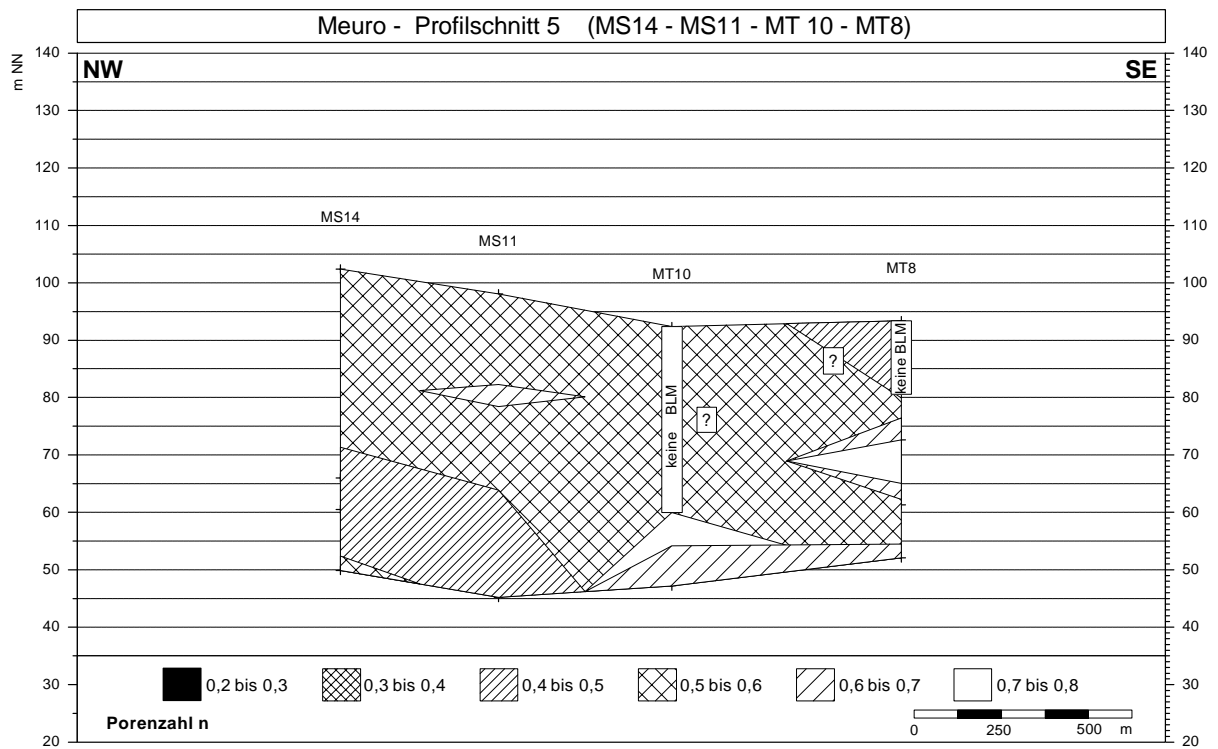
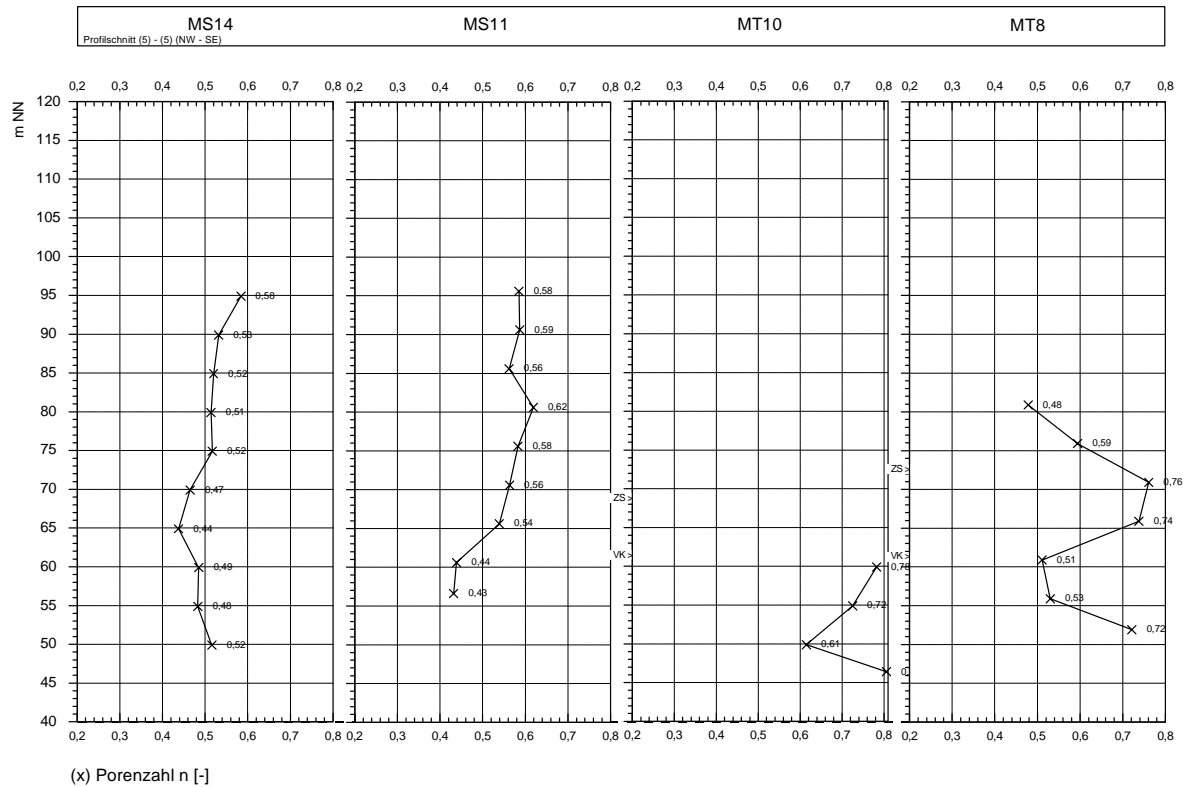
Meuro - Profilschnitt 12 (MS3 - MS7 - MT8)

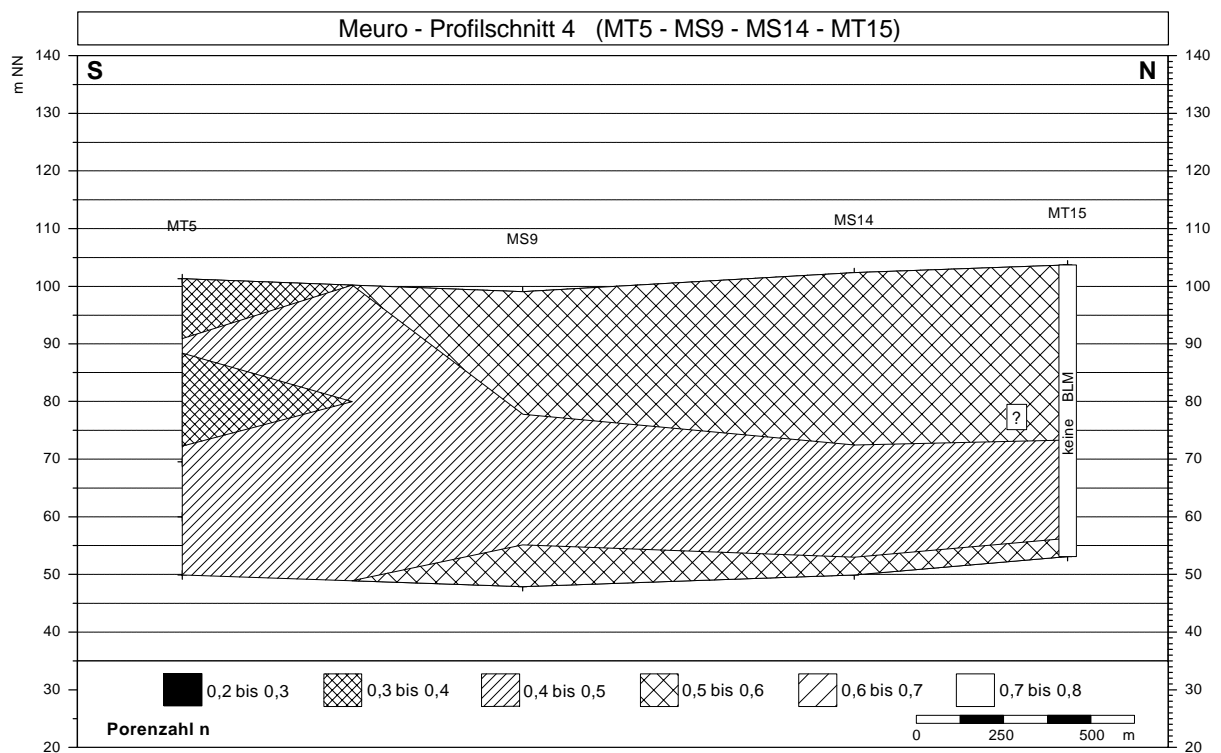
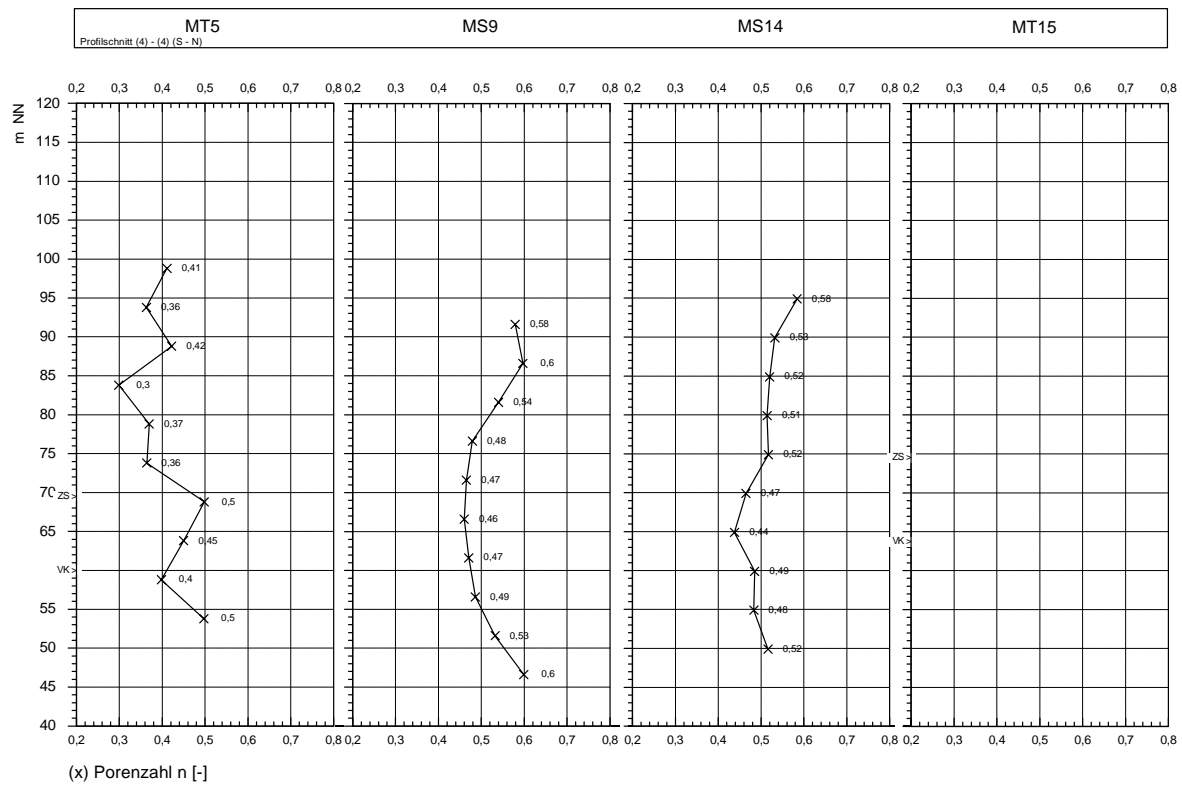


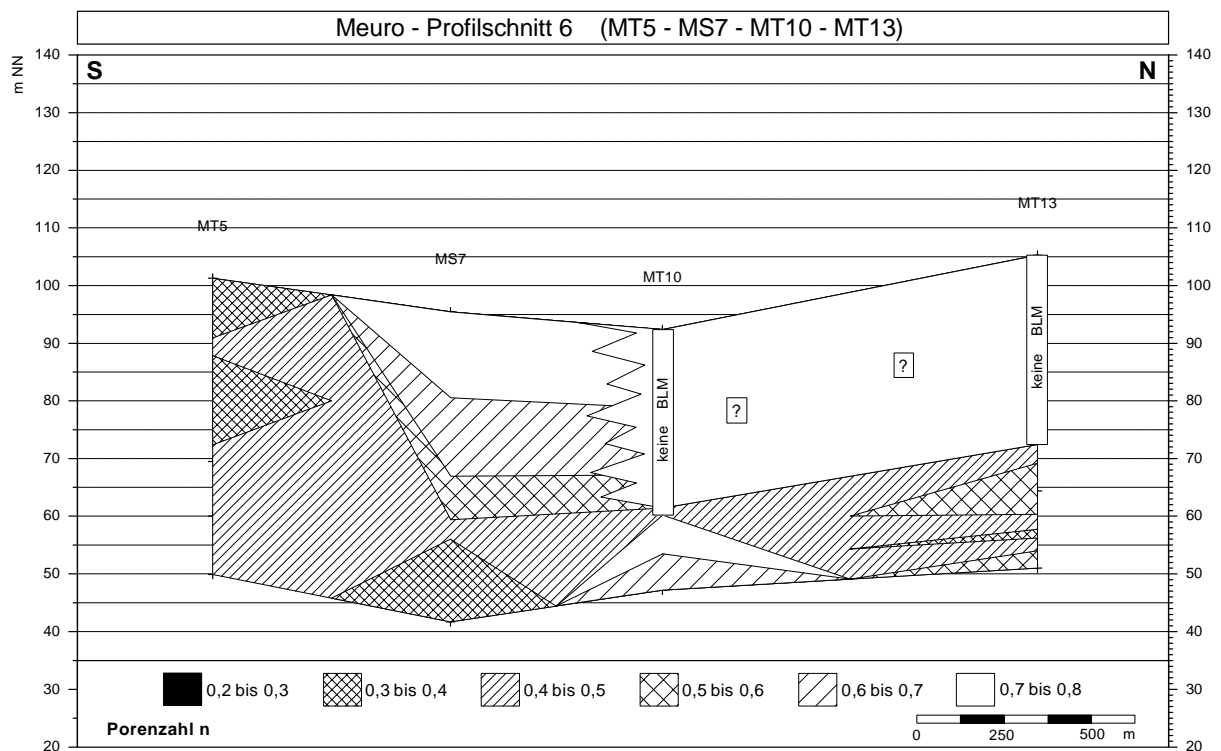
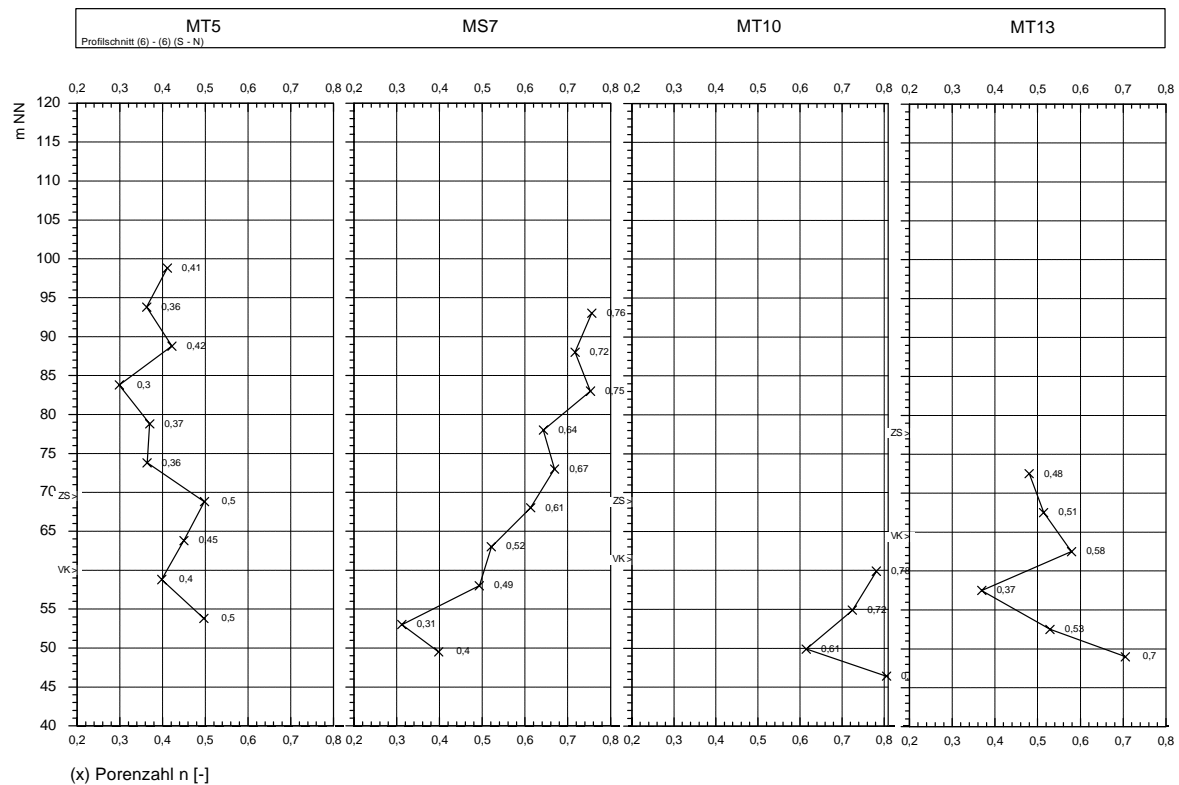


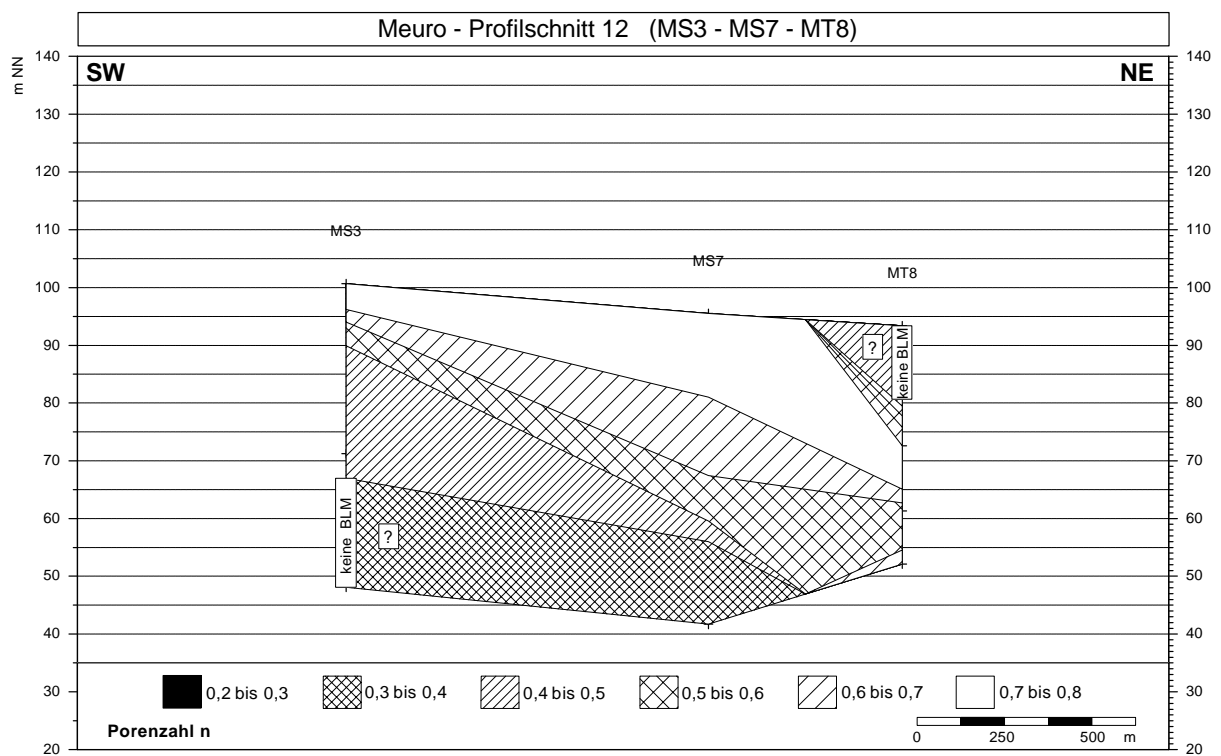
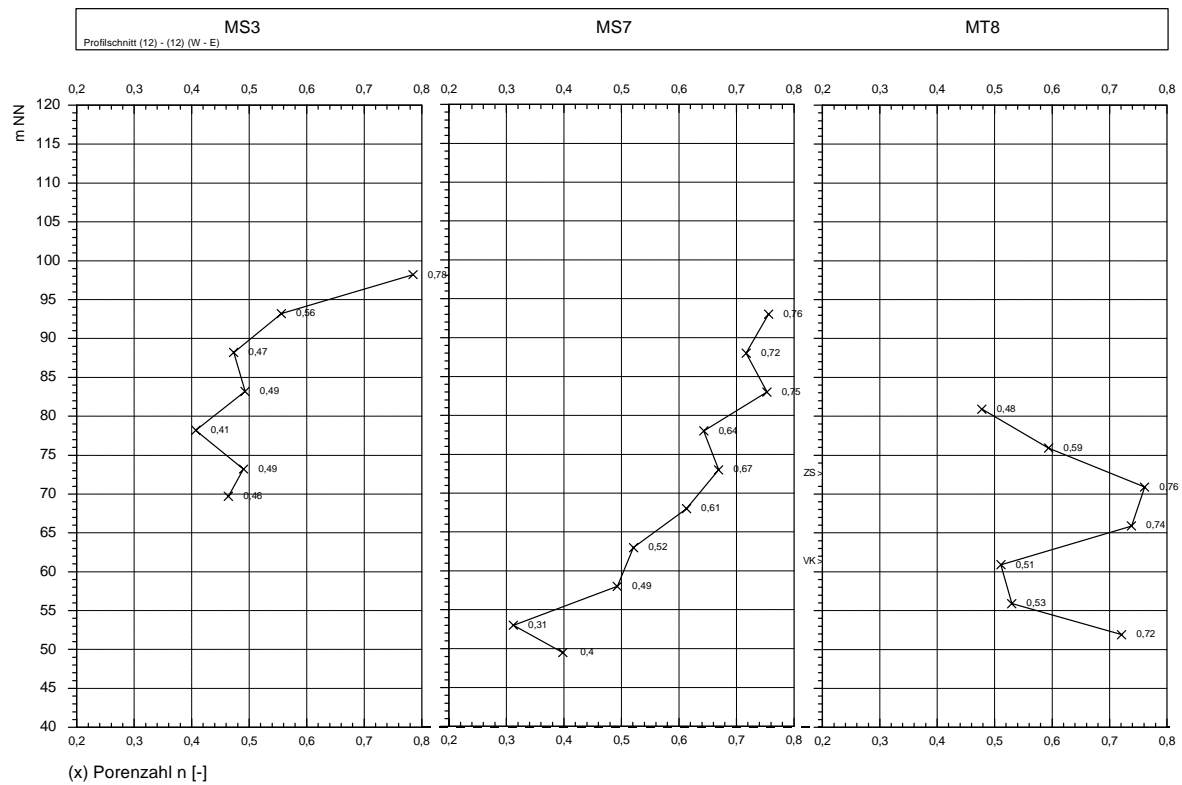


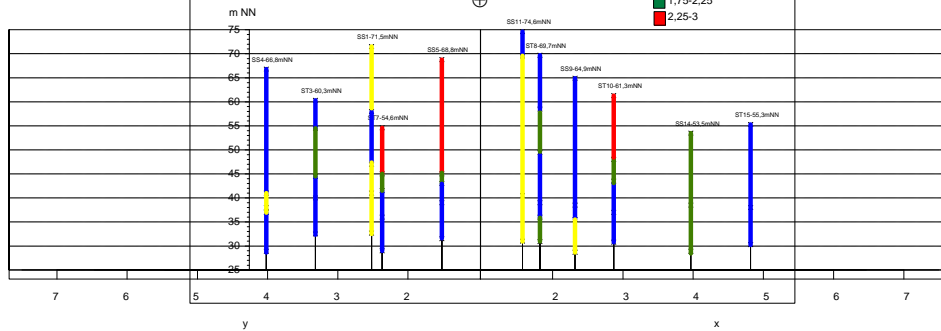
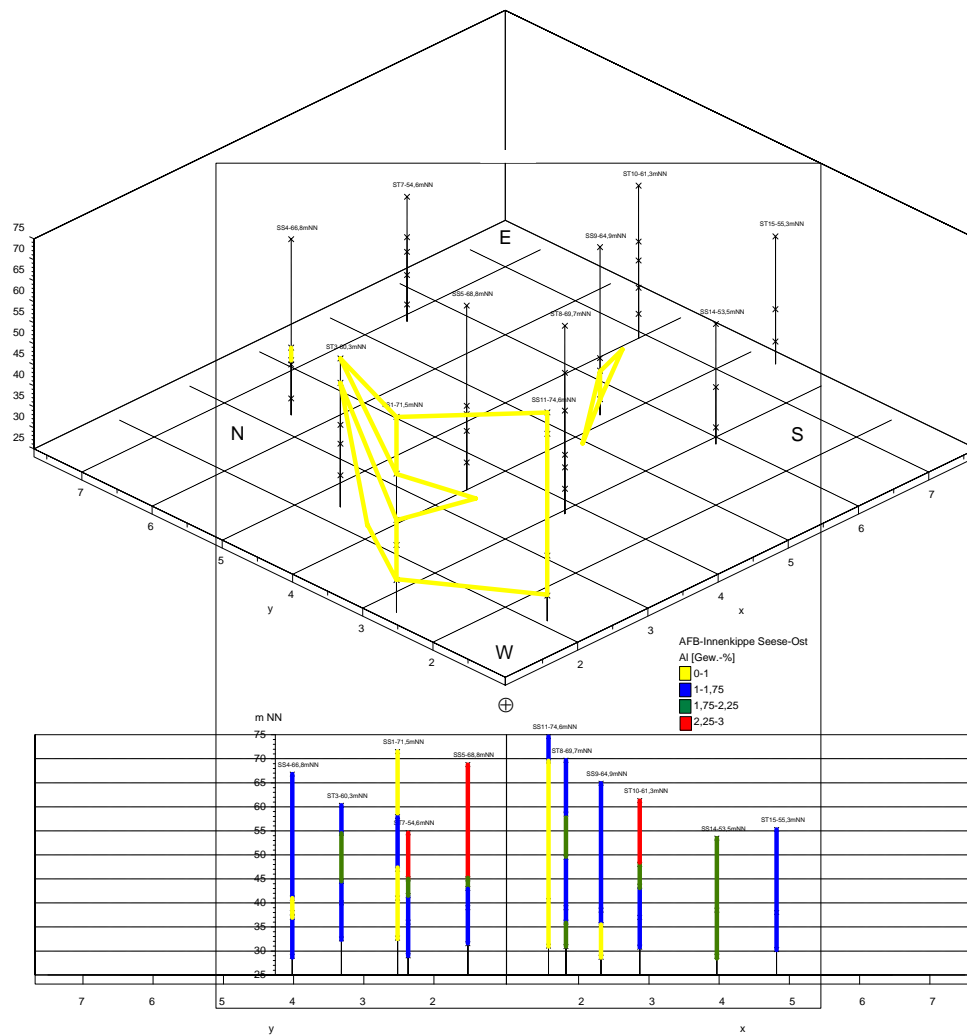


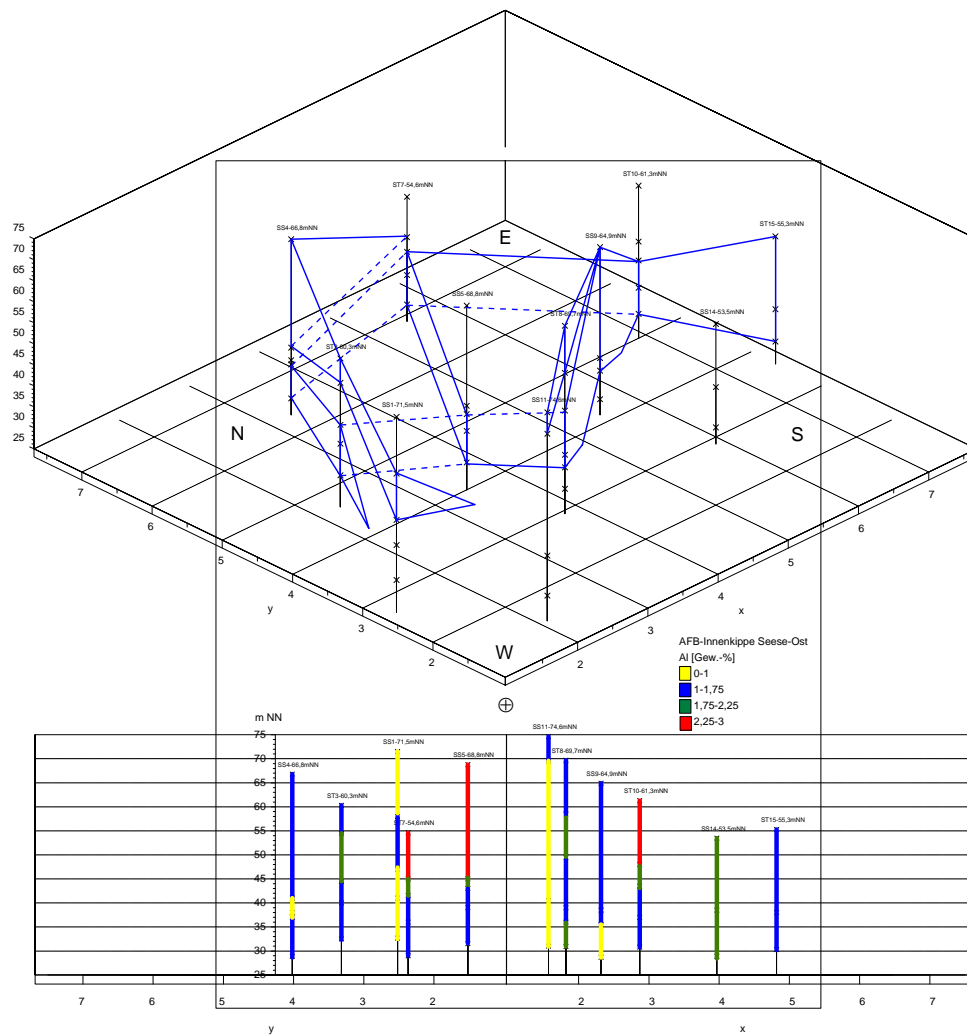


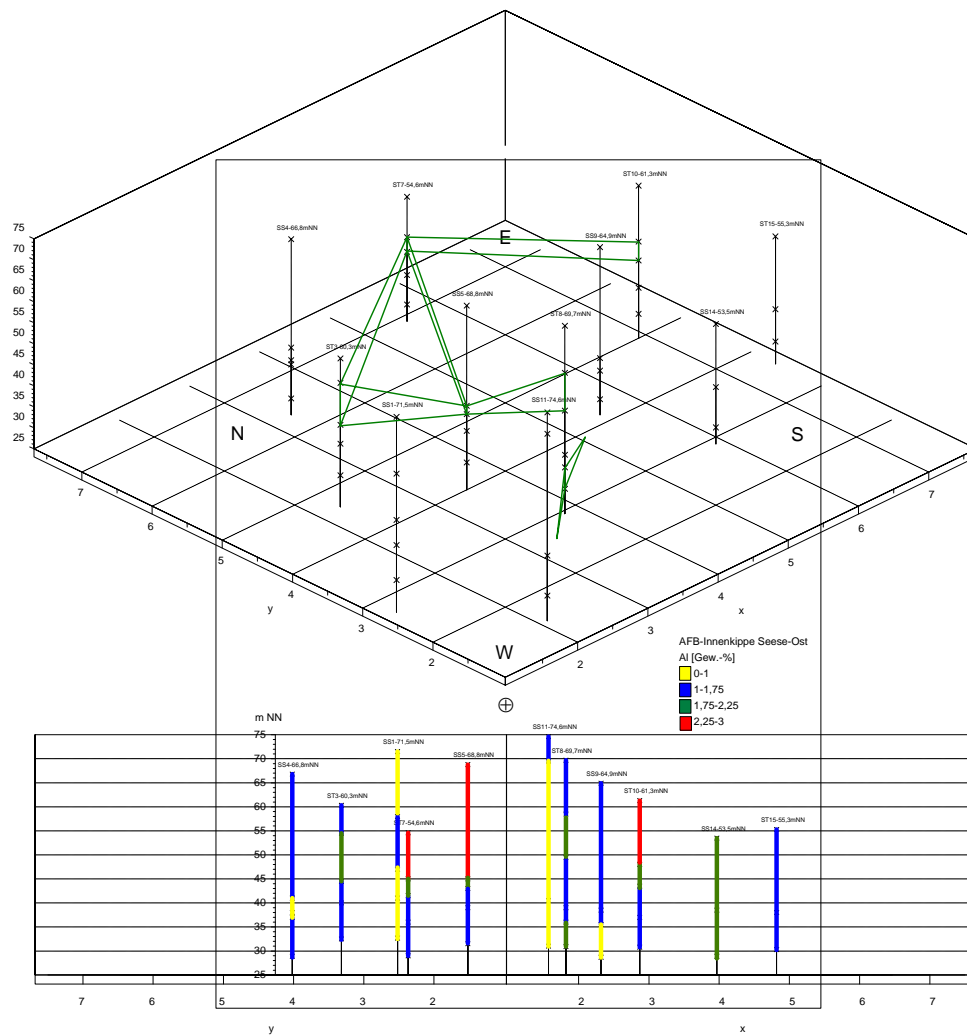


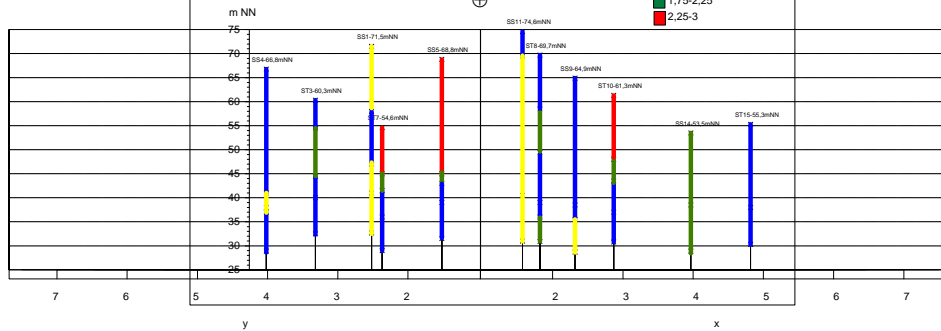
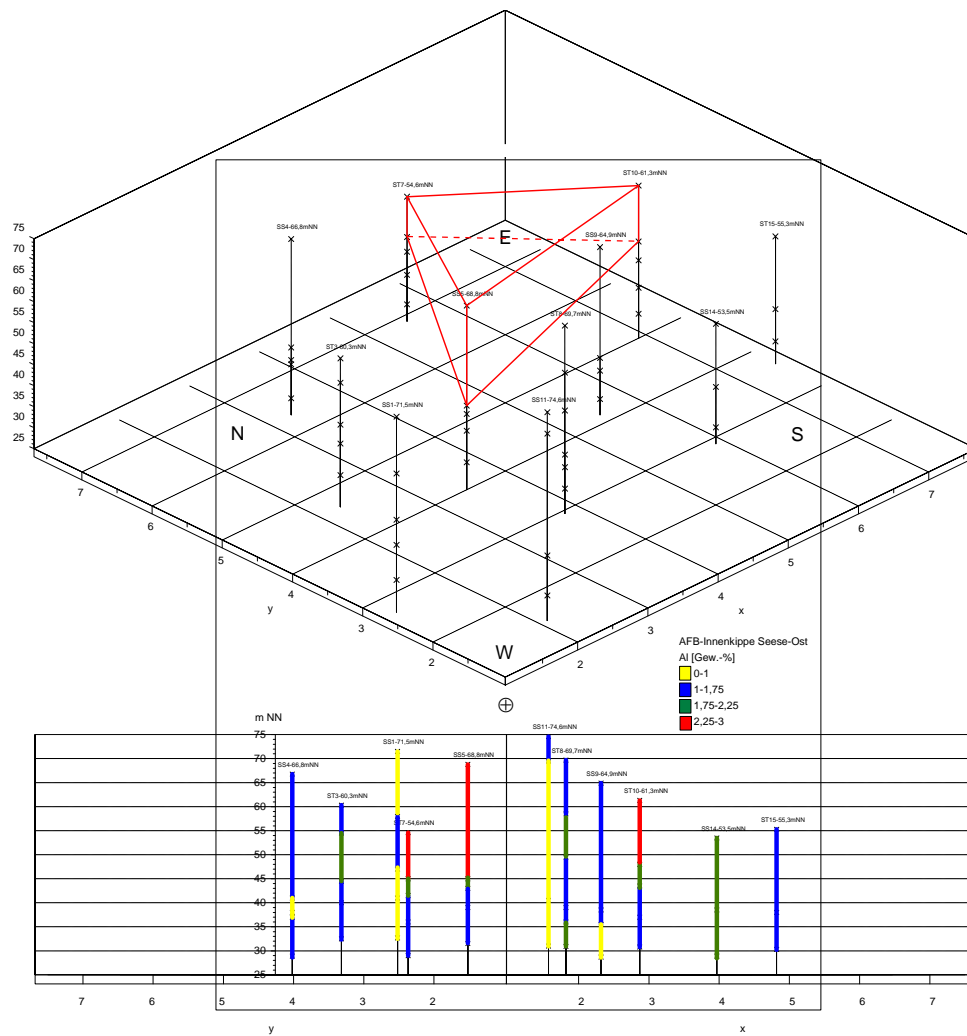


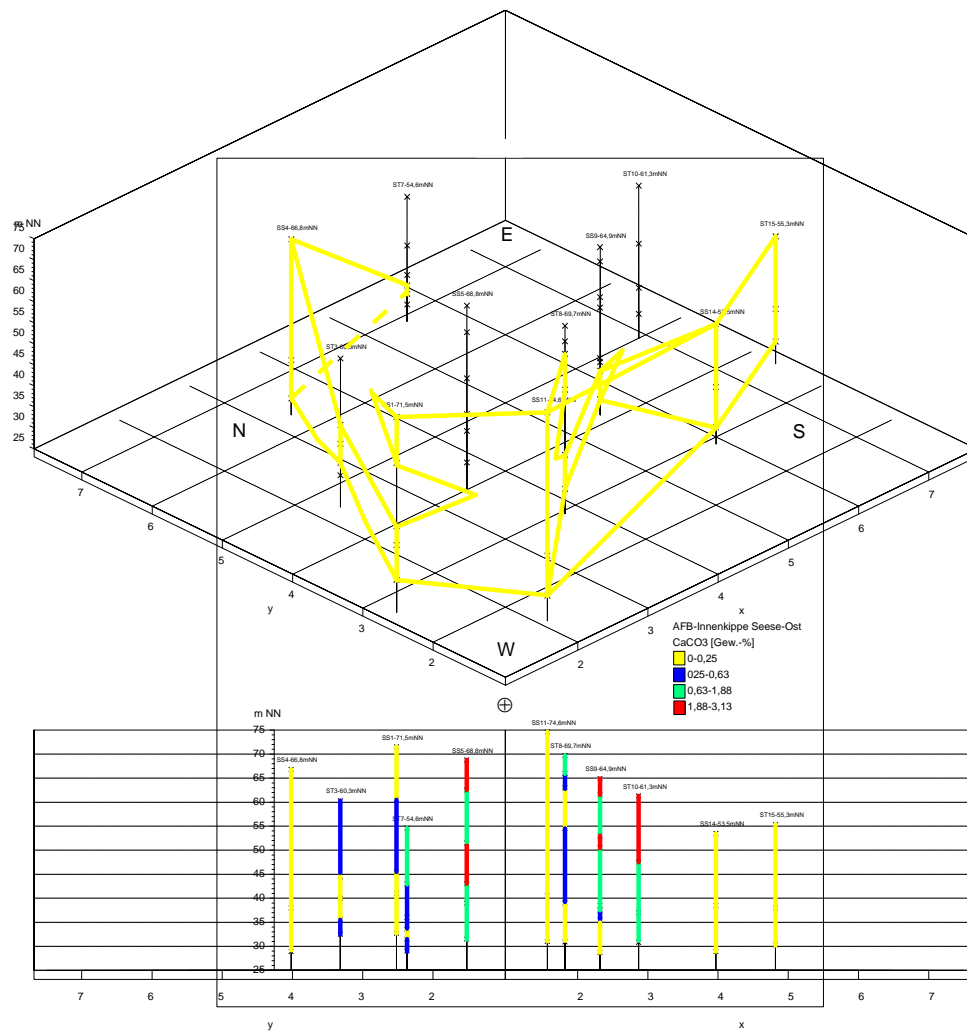


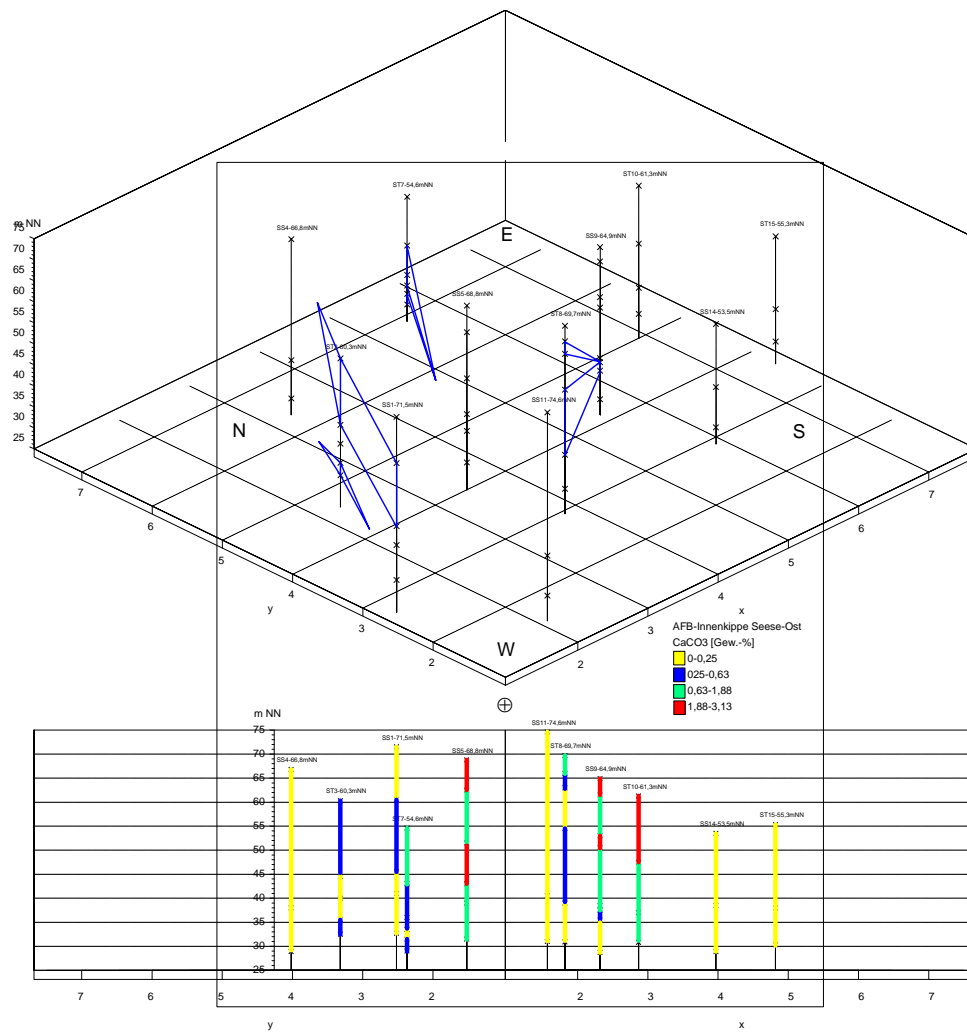


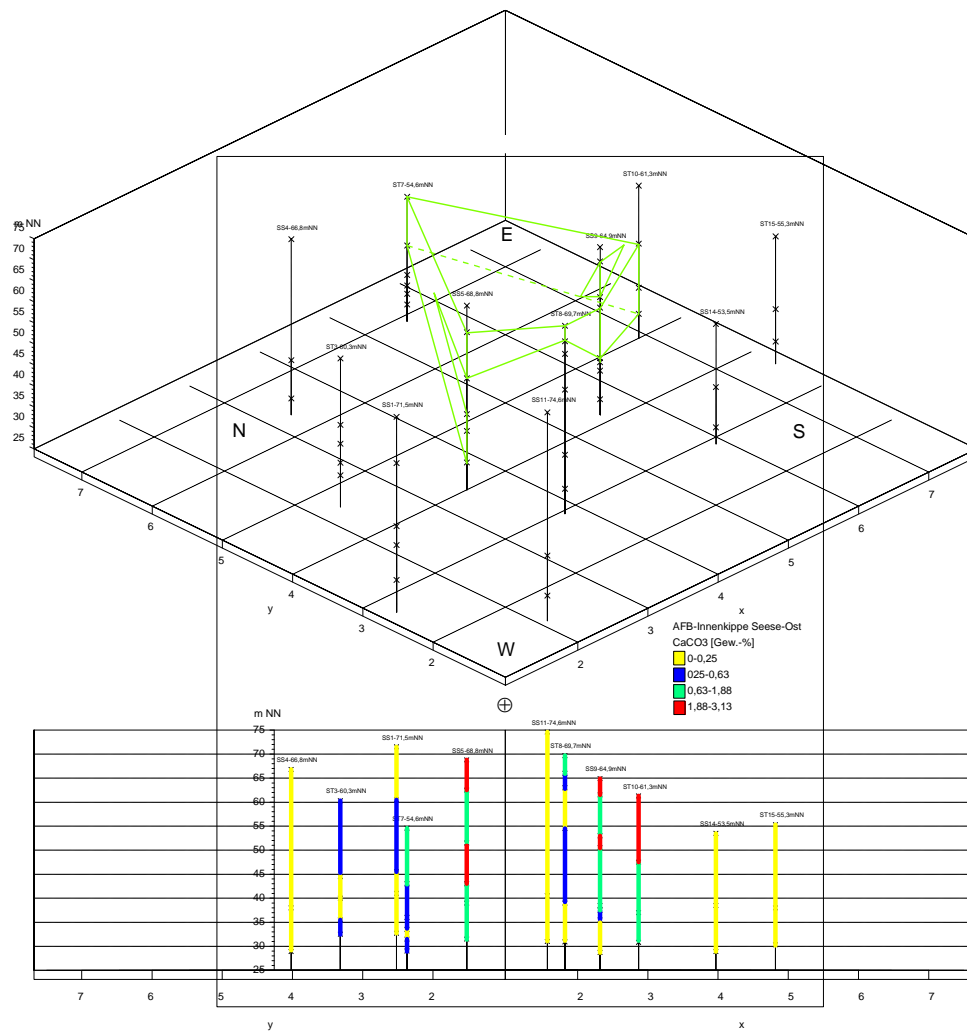


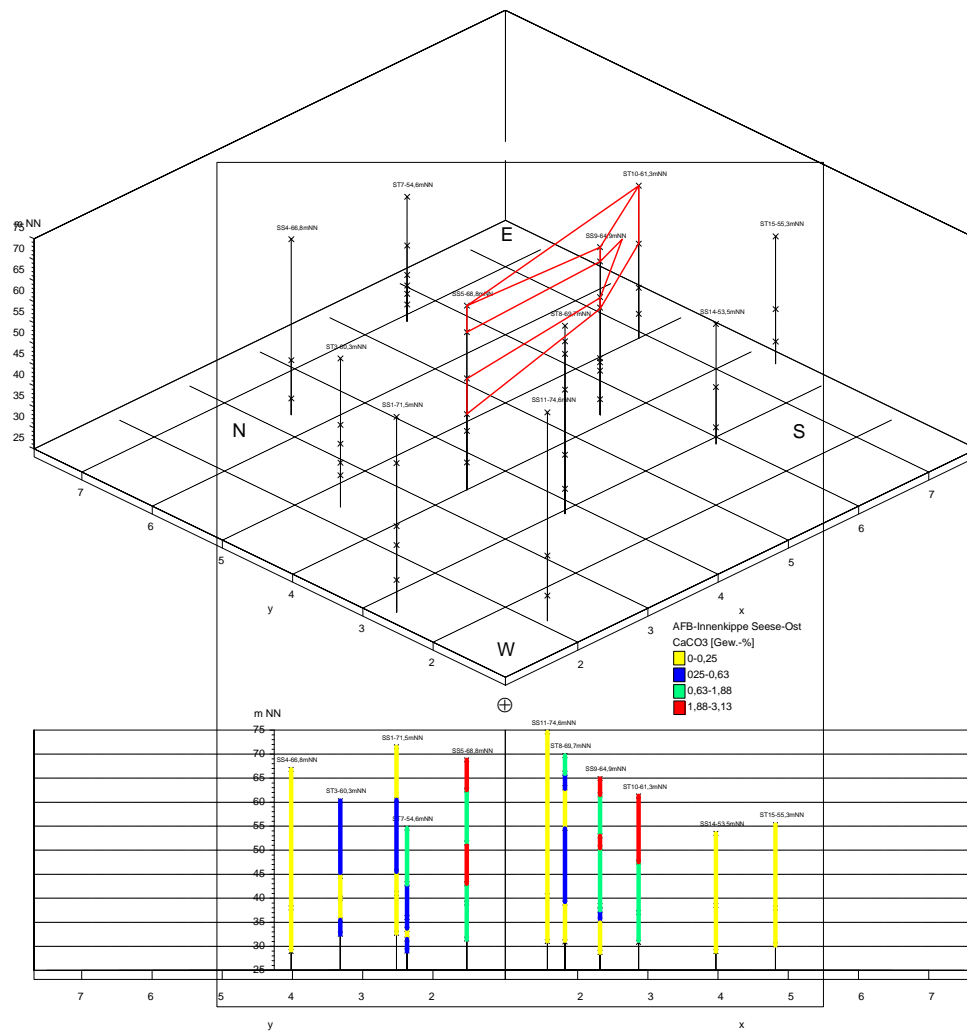


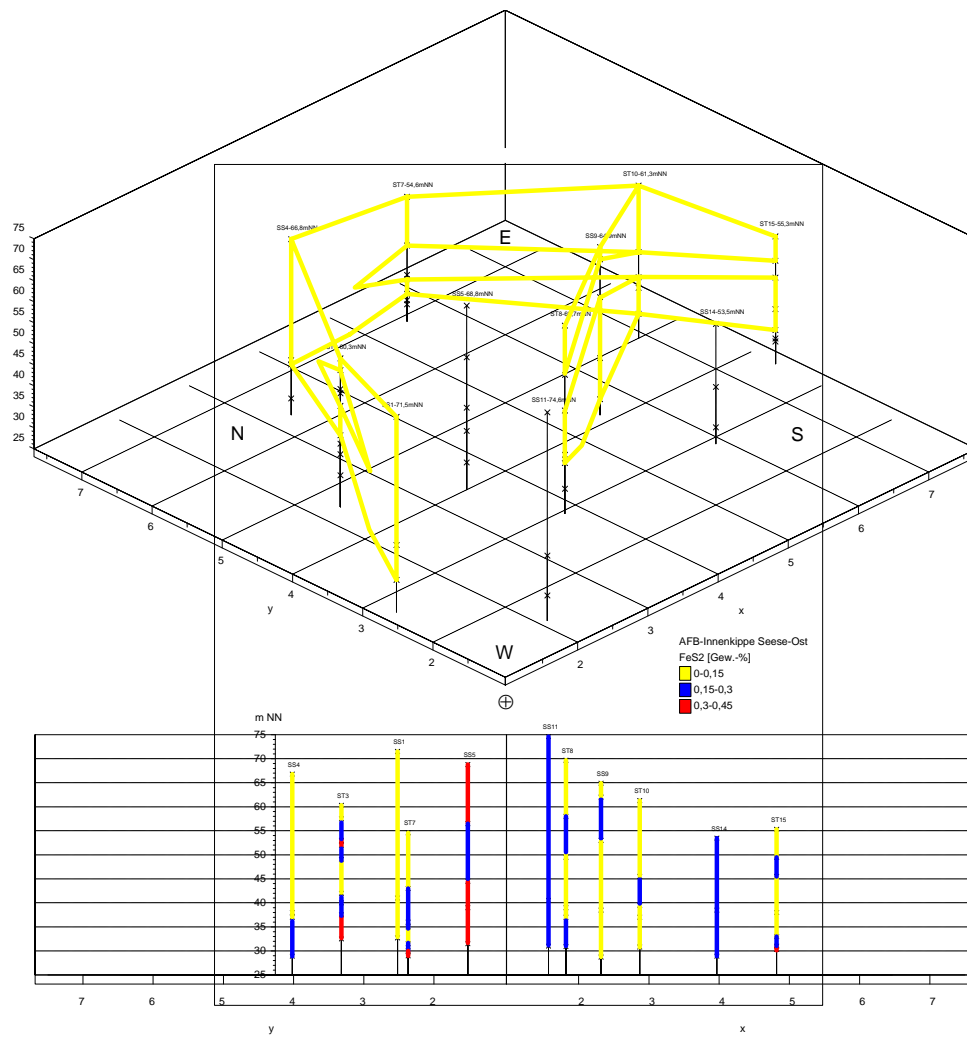


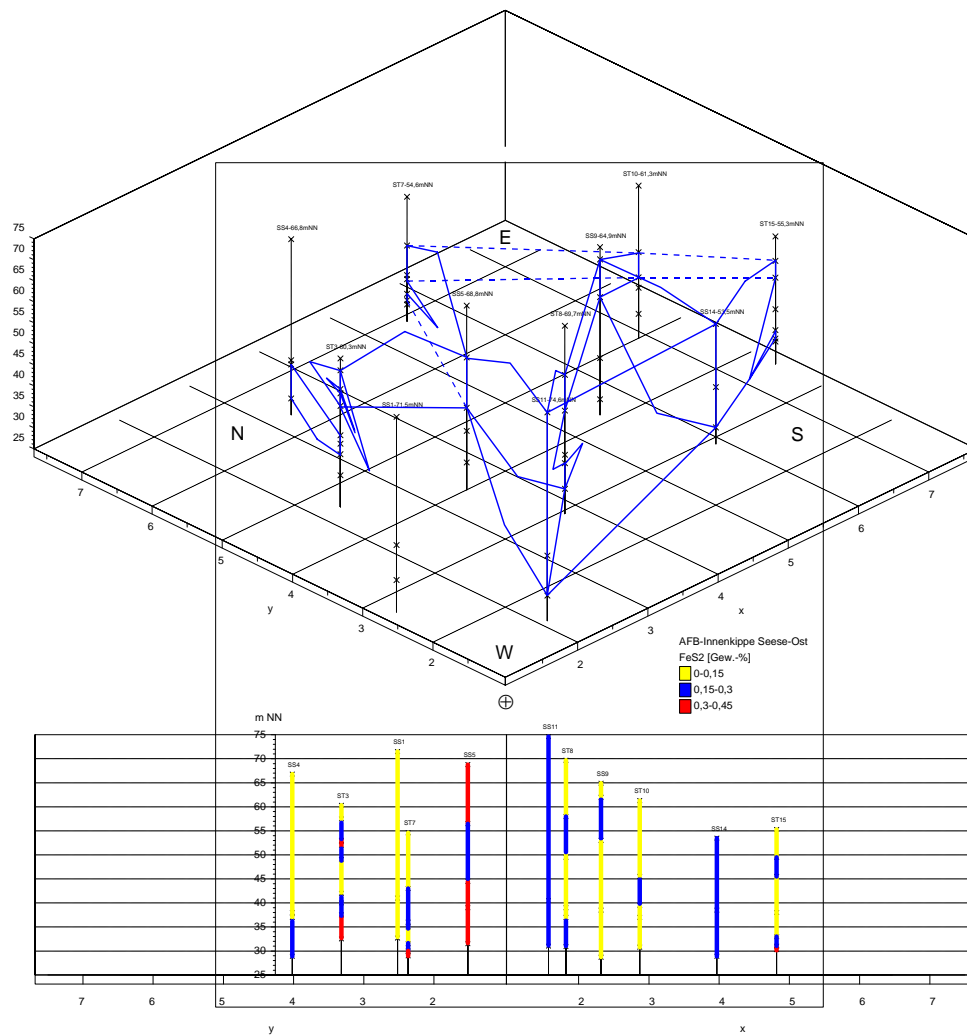


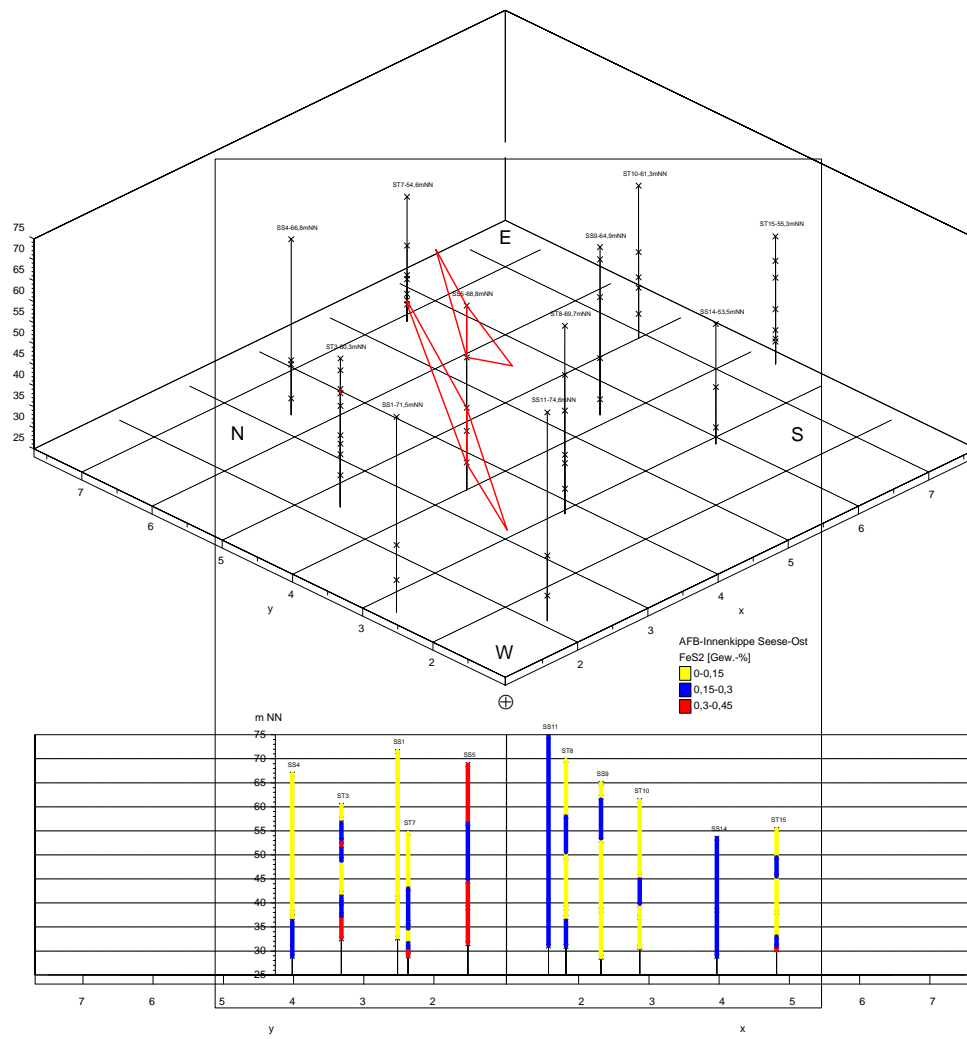


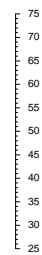
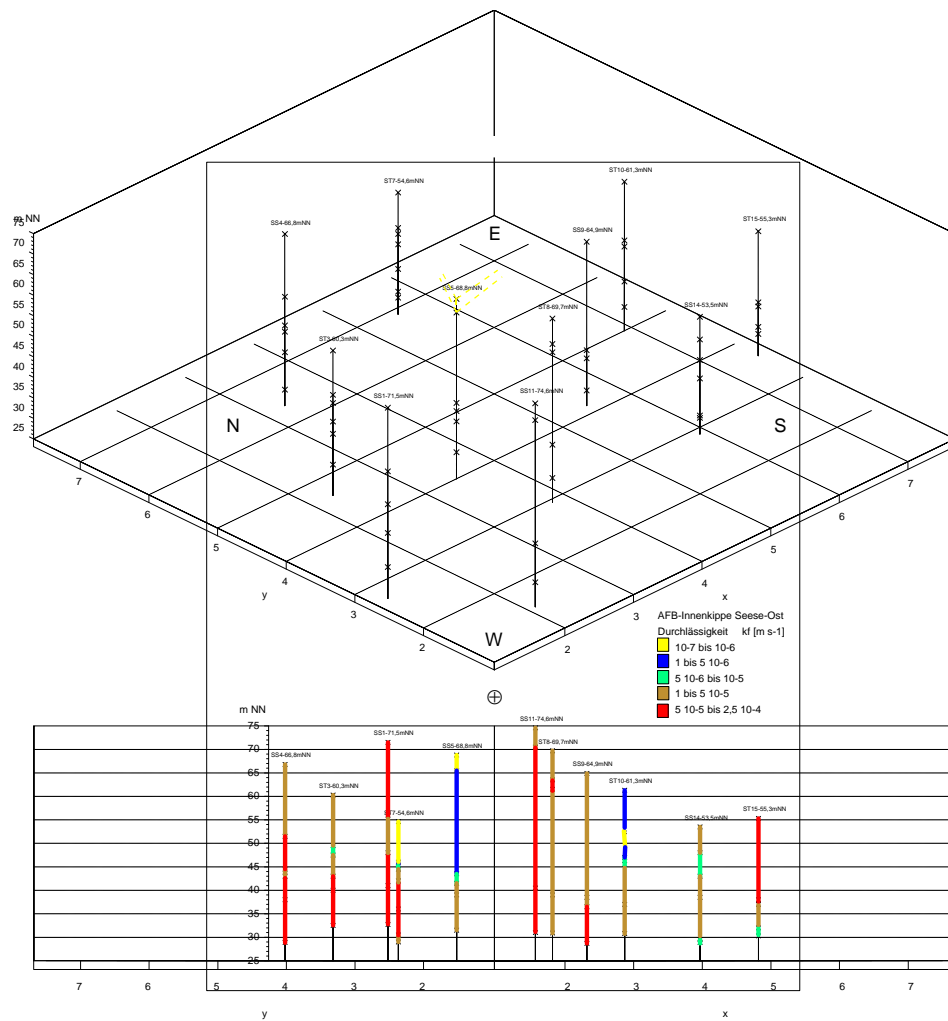


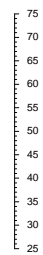
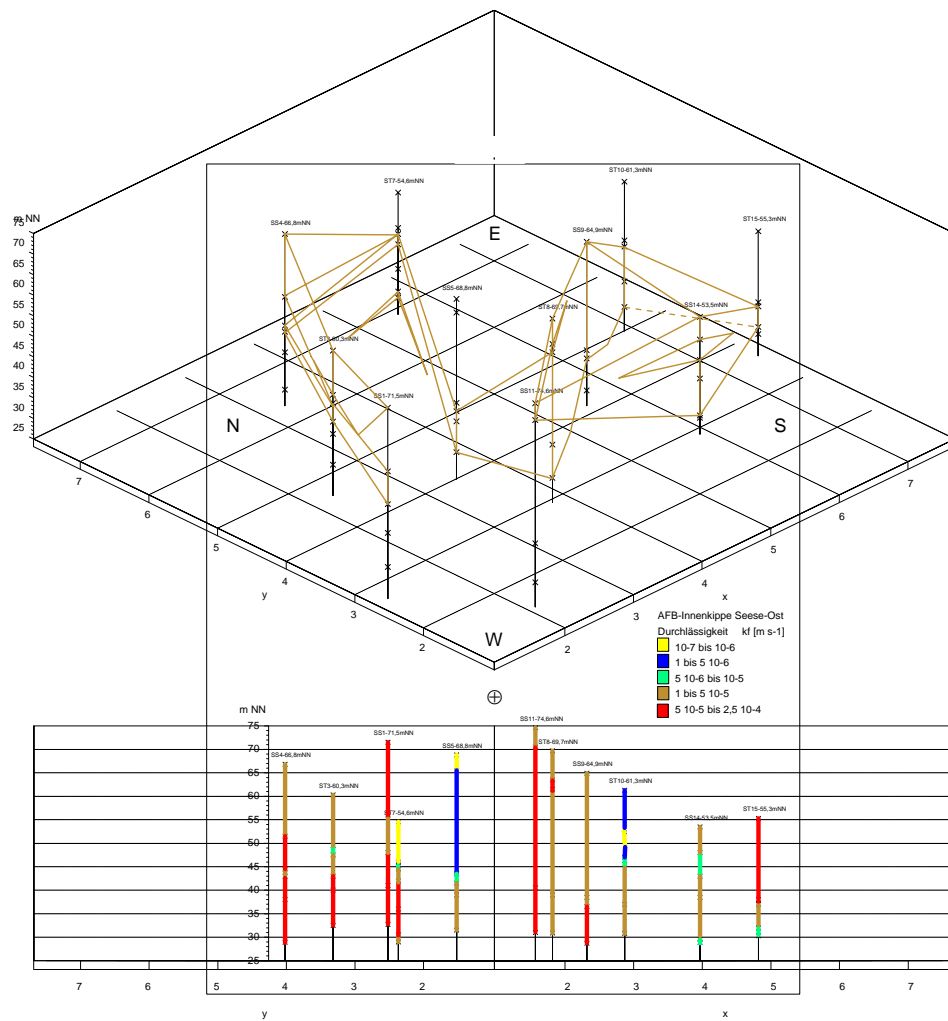


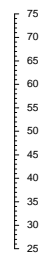
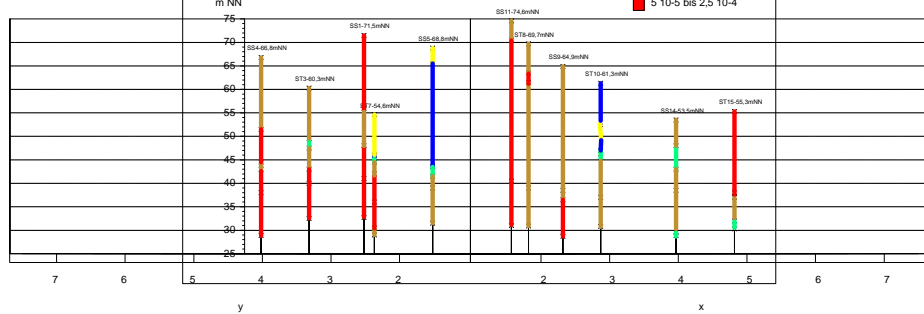
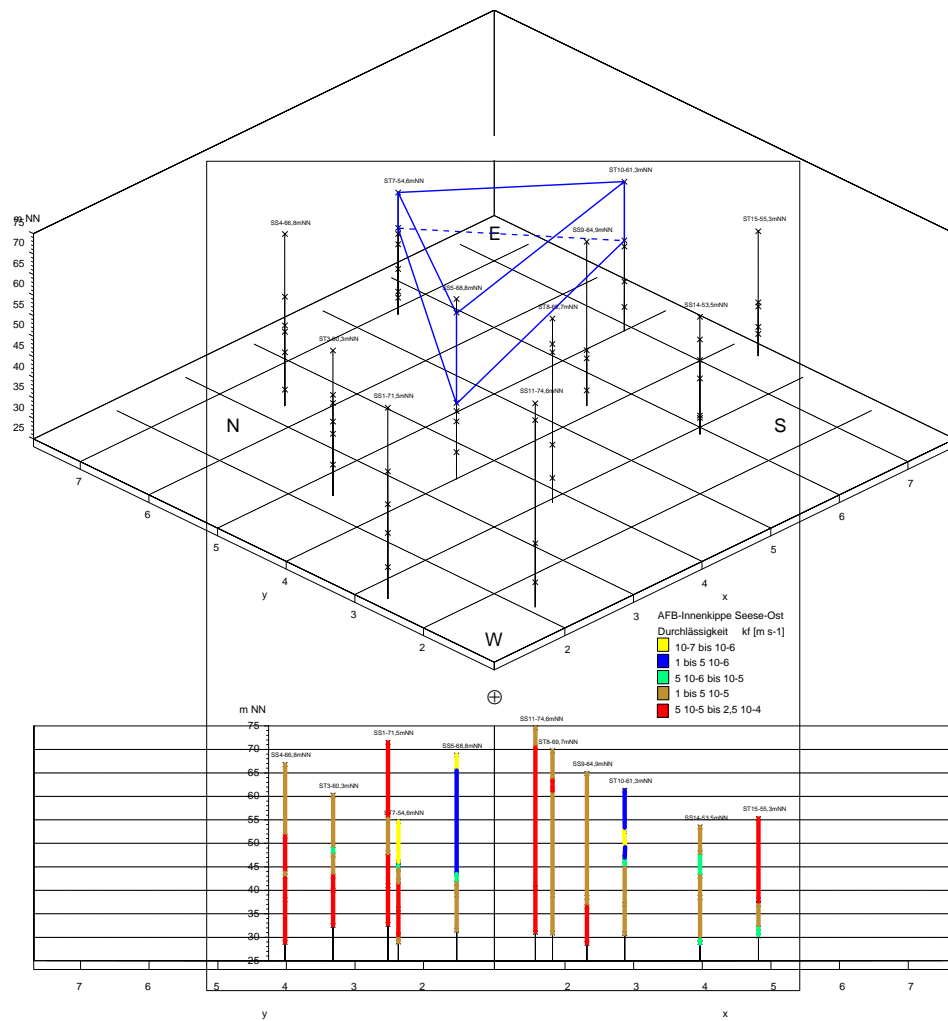


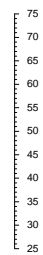
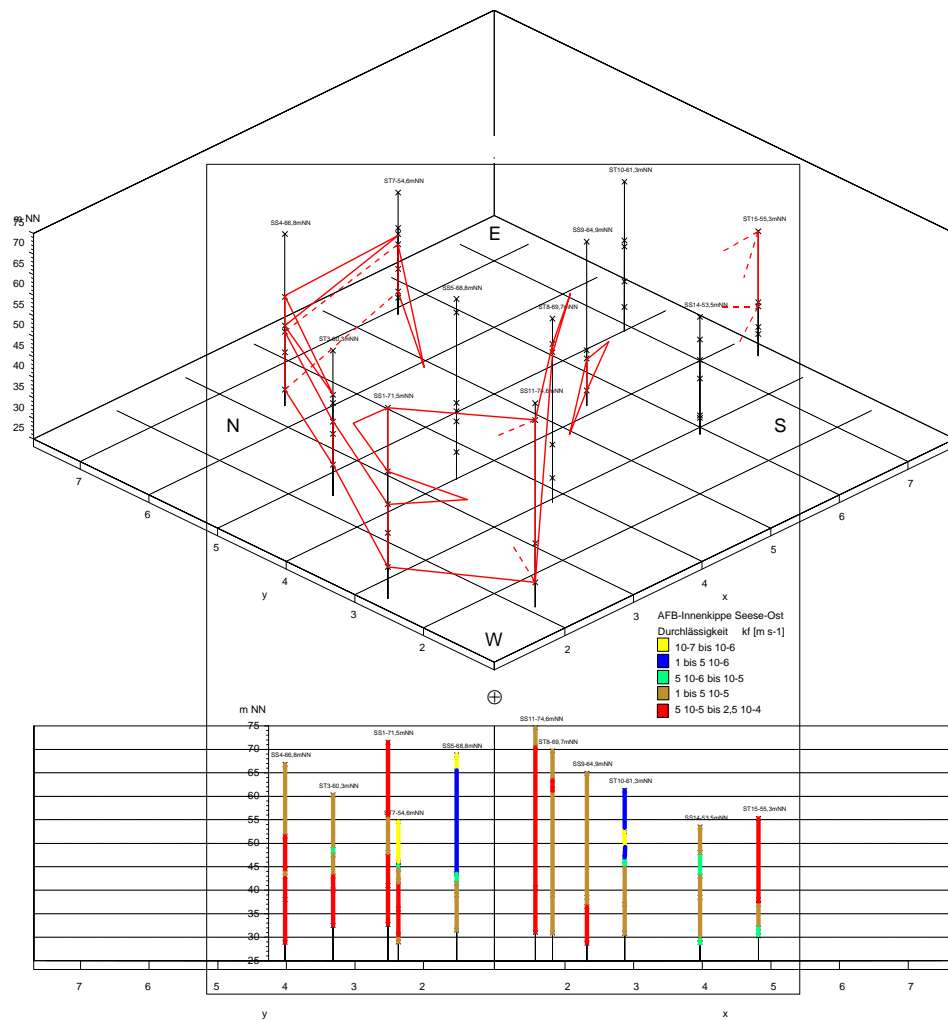


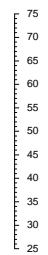
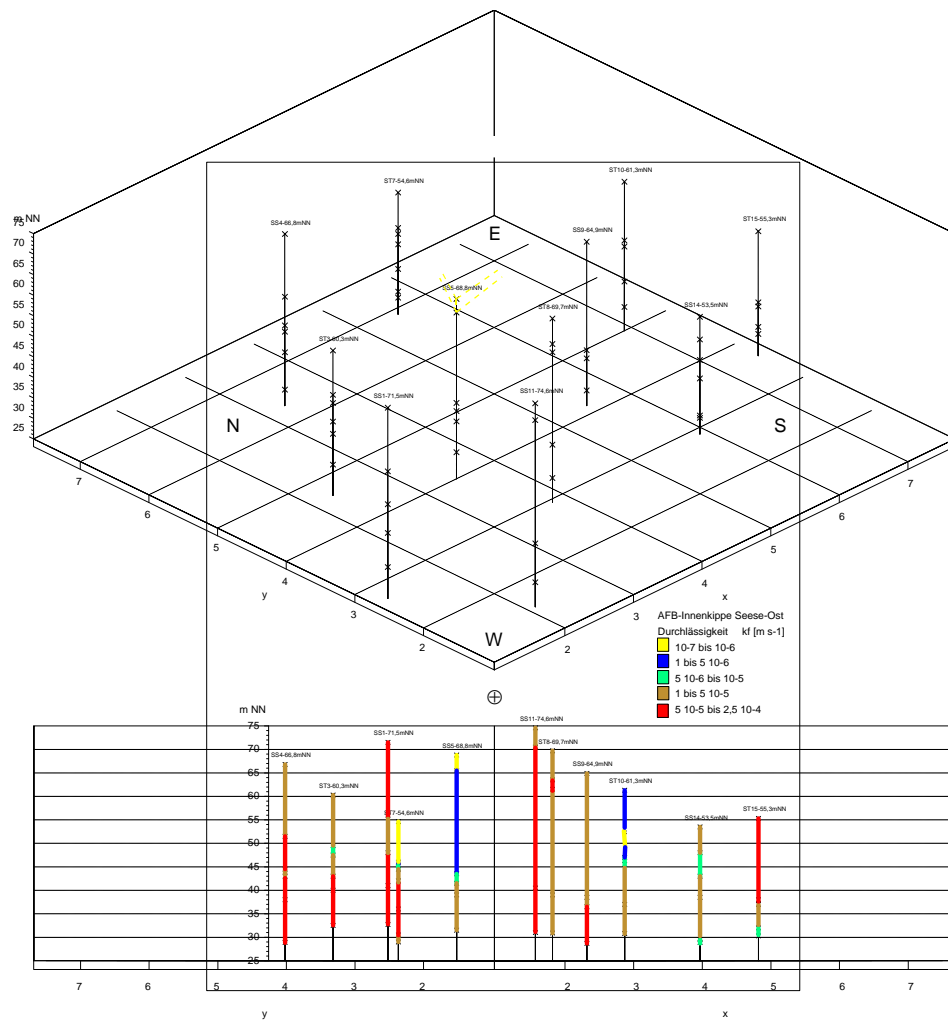


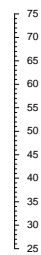
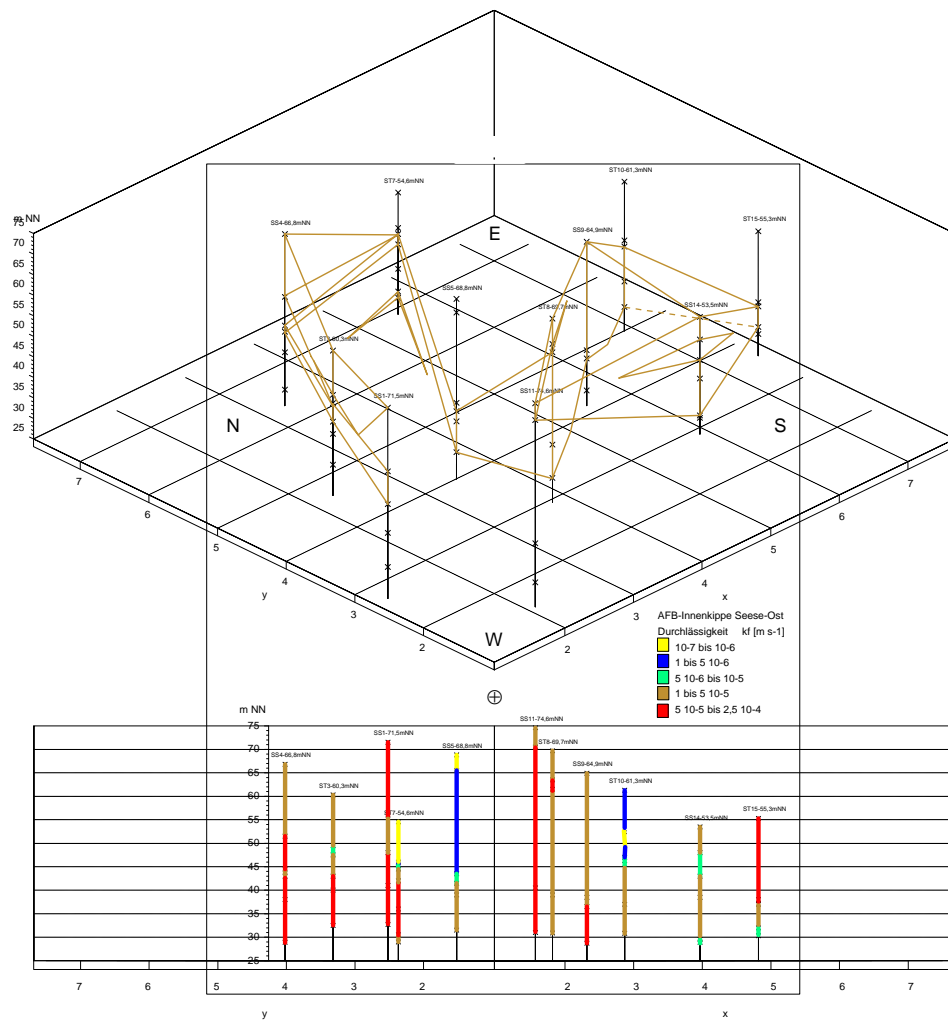


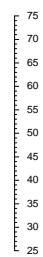
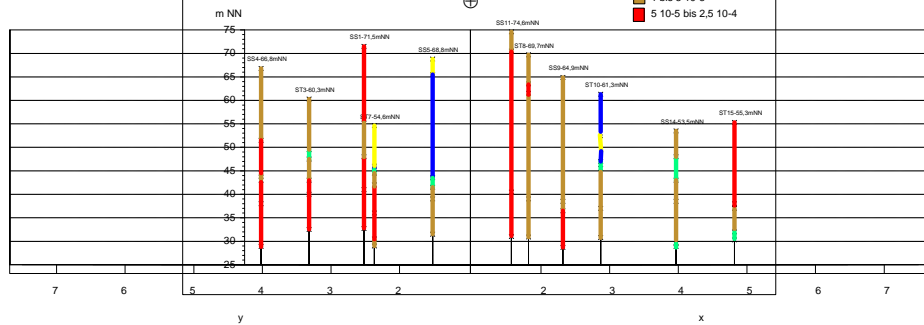
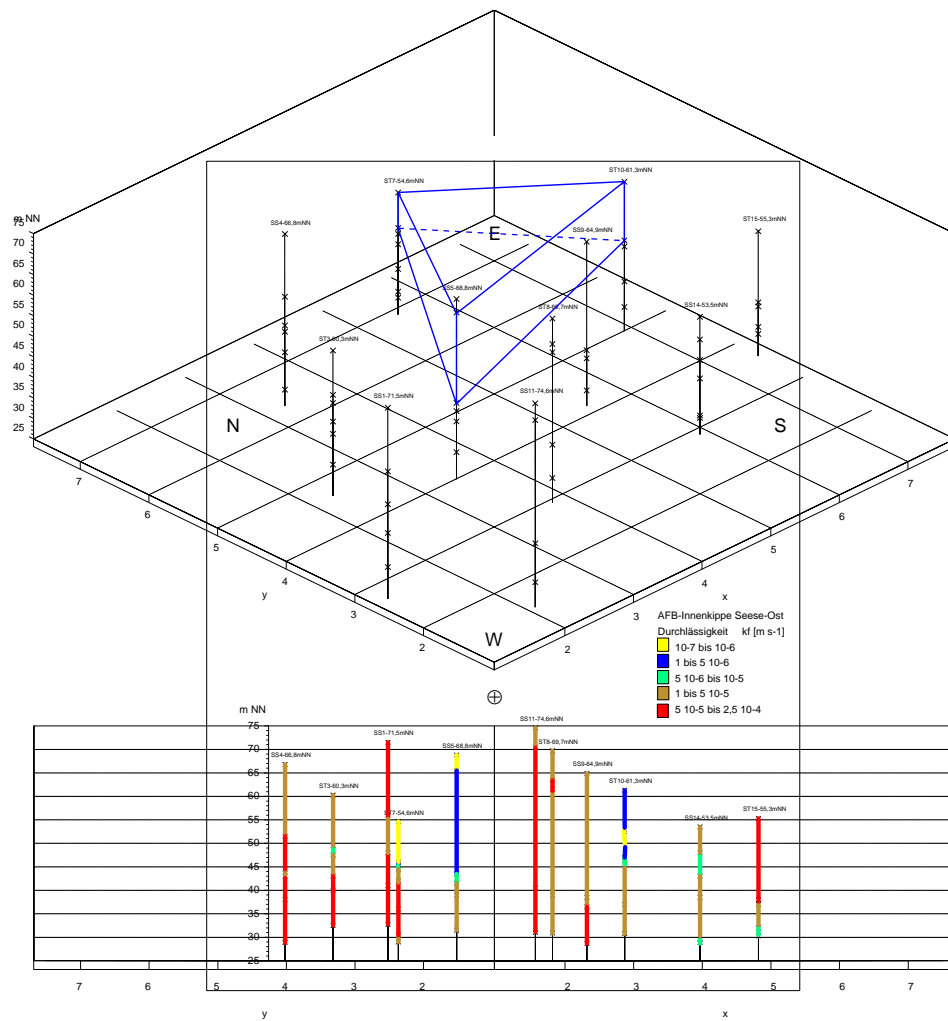


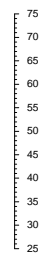
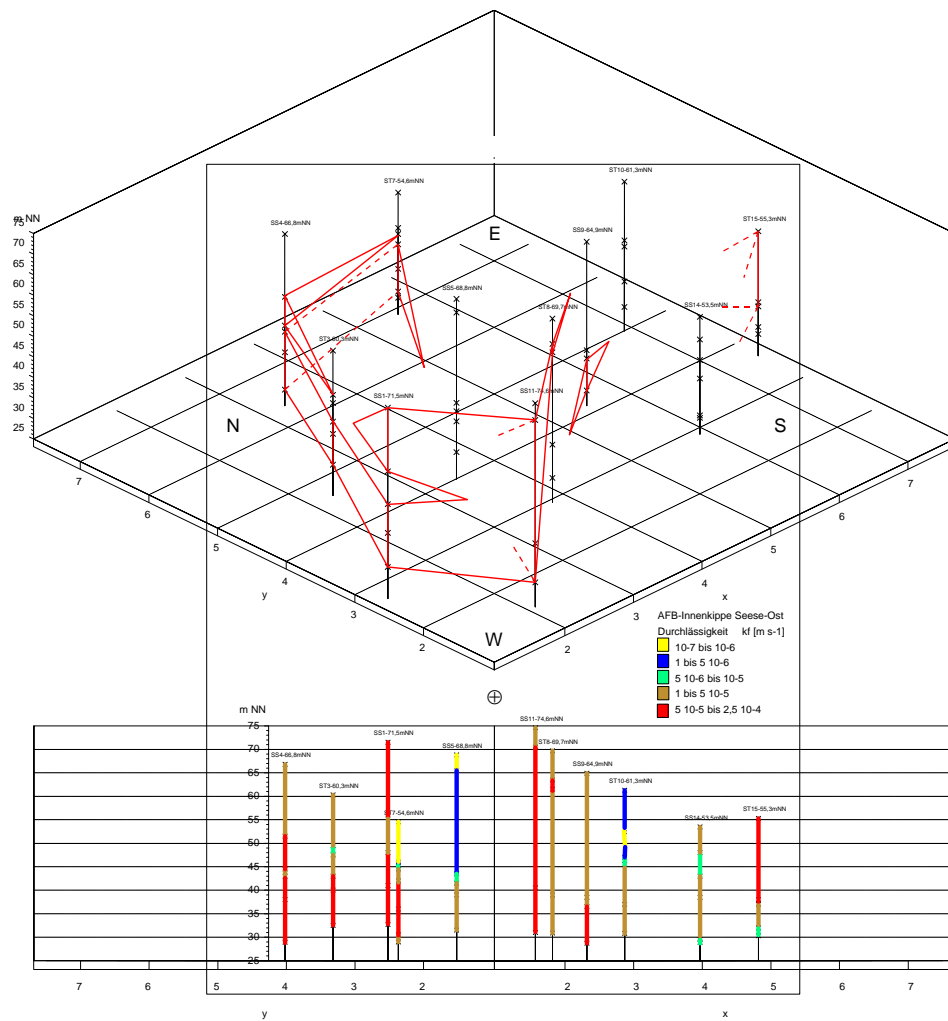


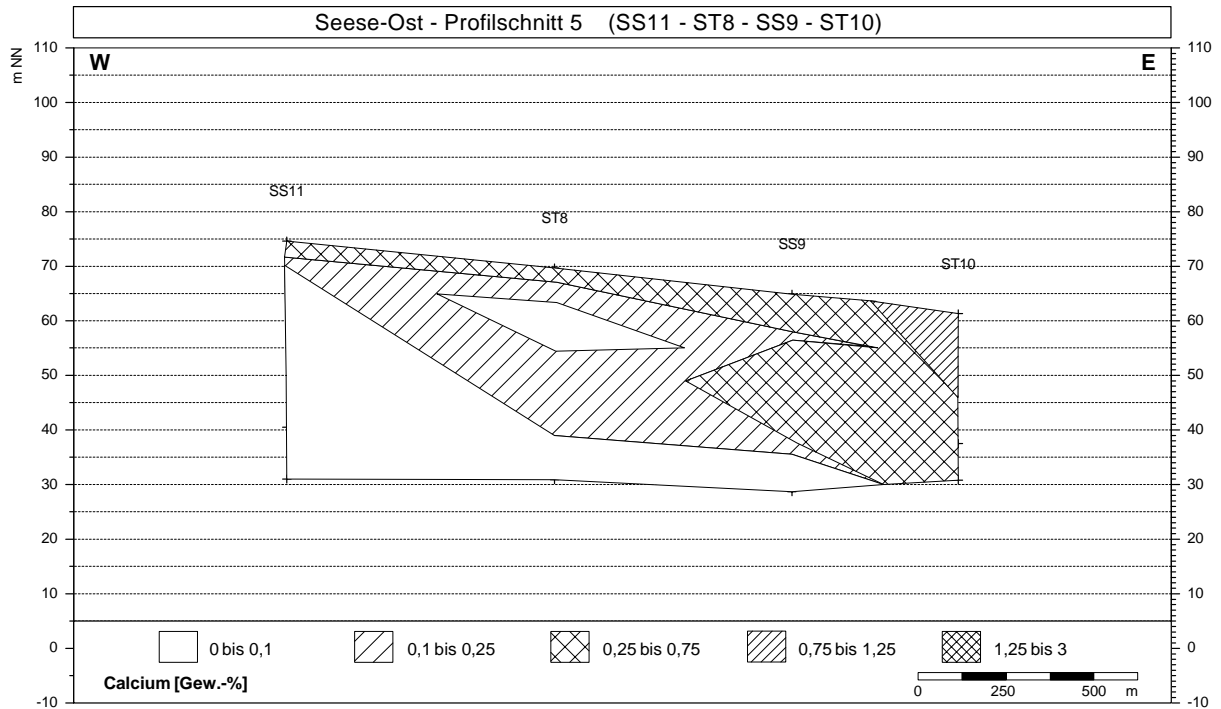
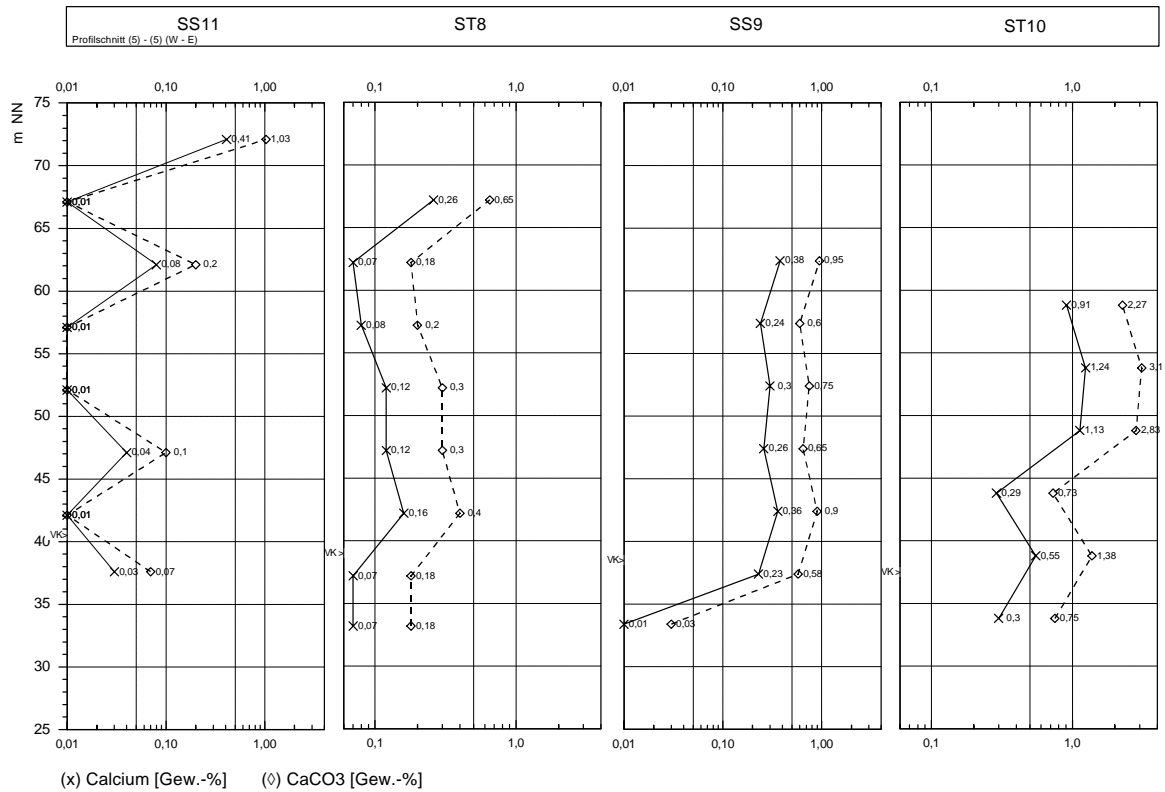






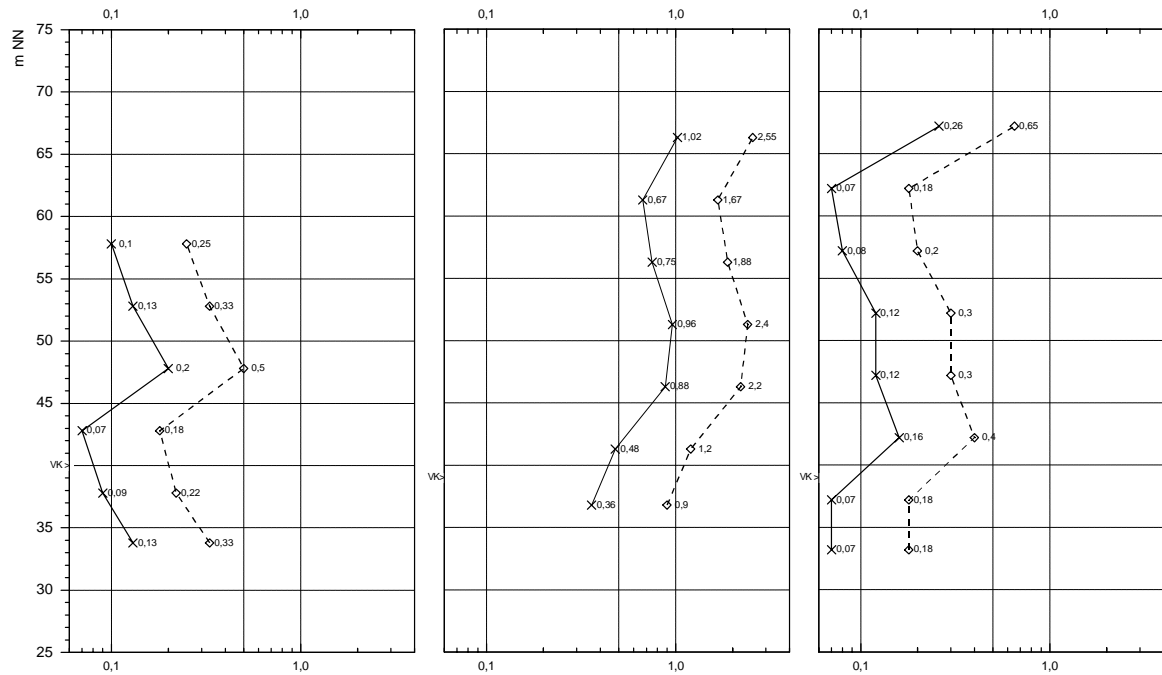




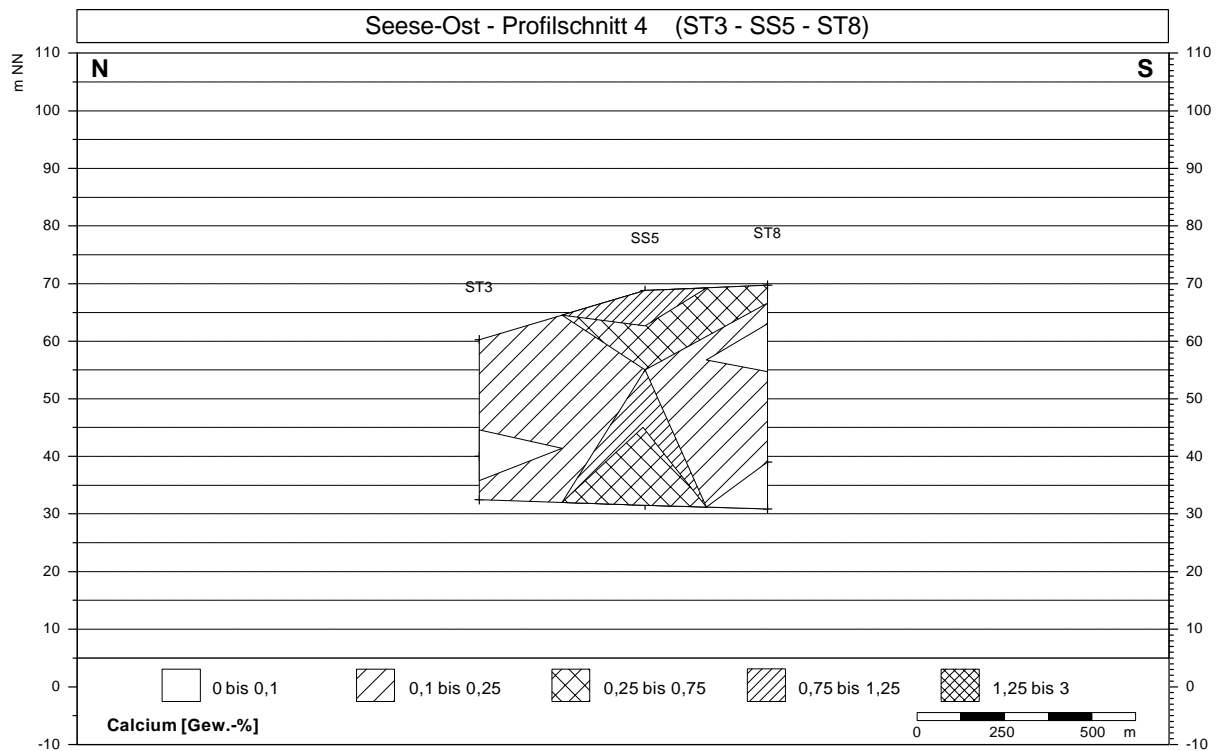


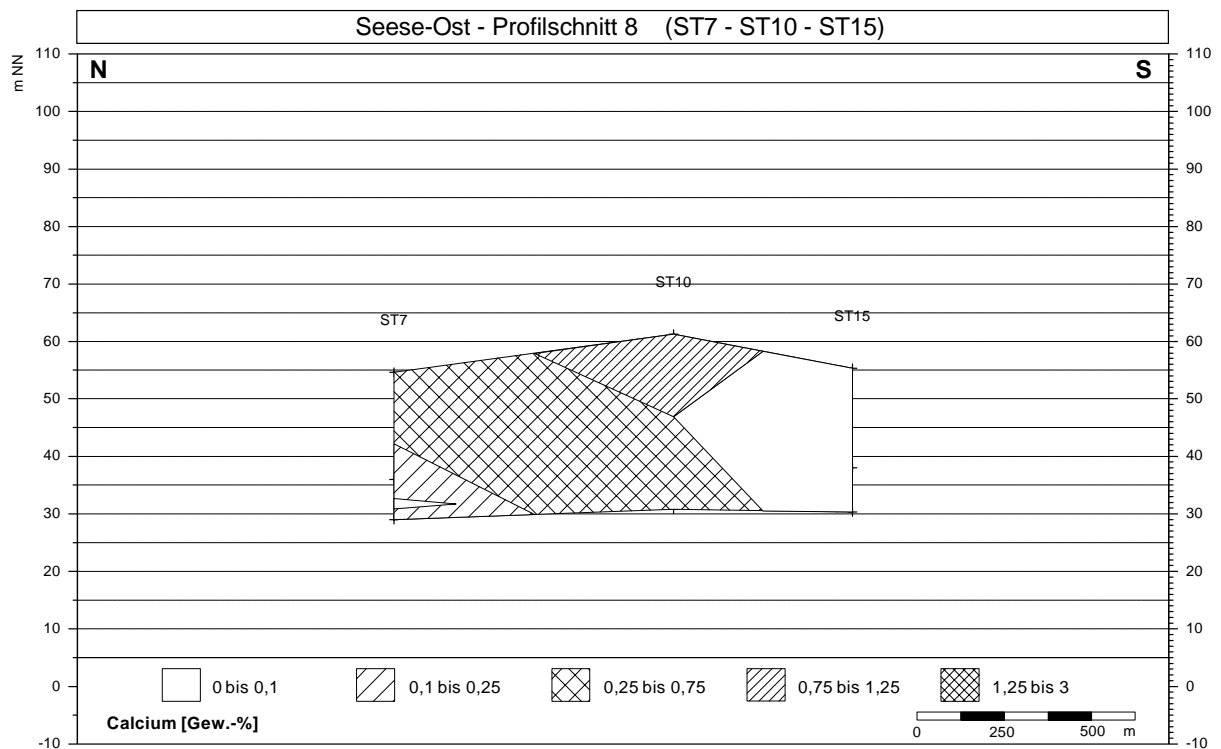
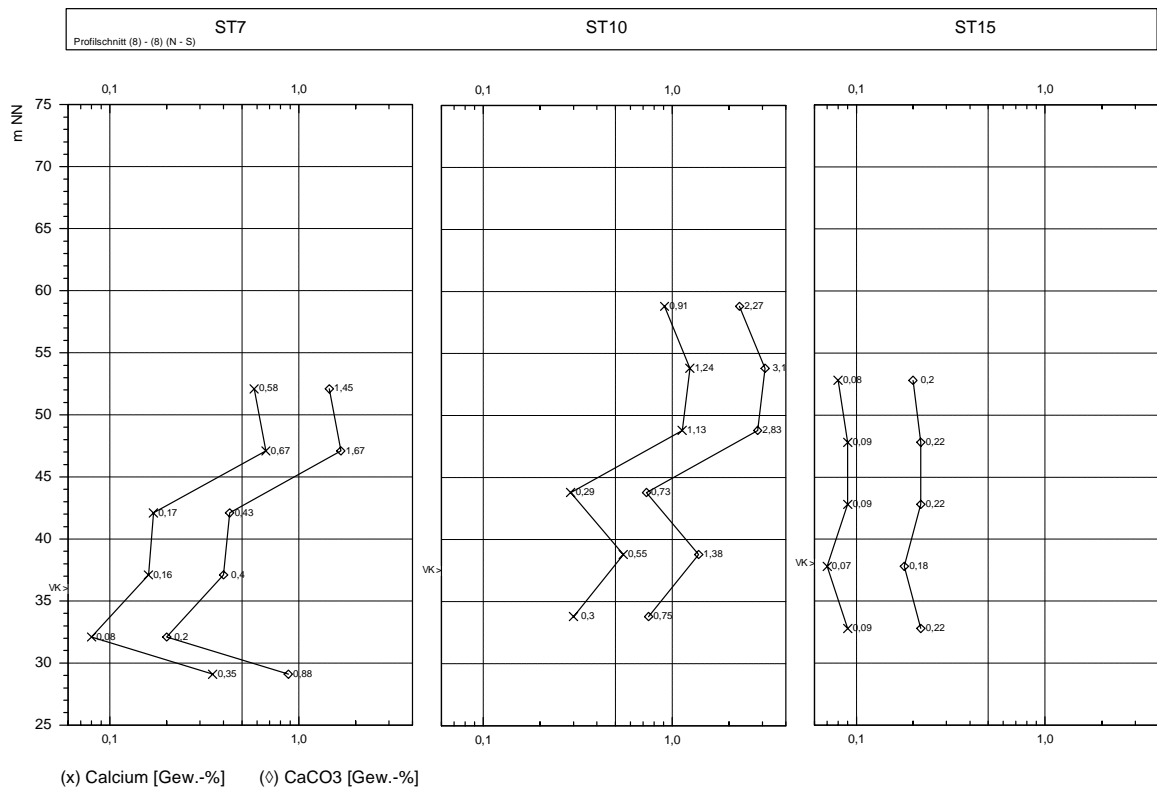
ST3 SS5 ST8

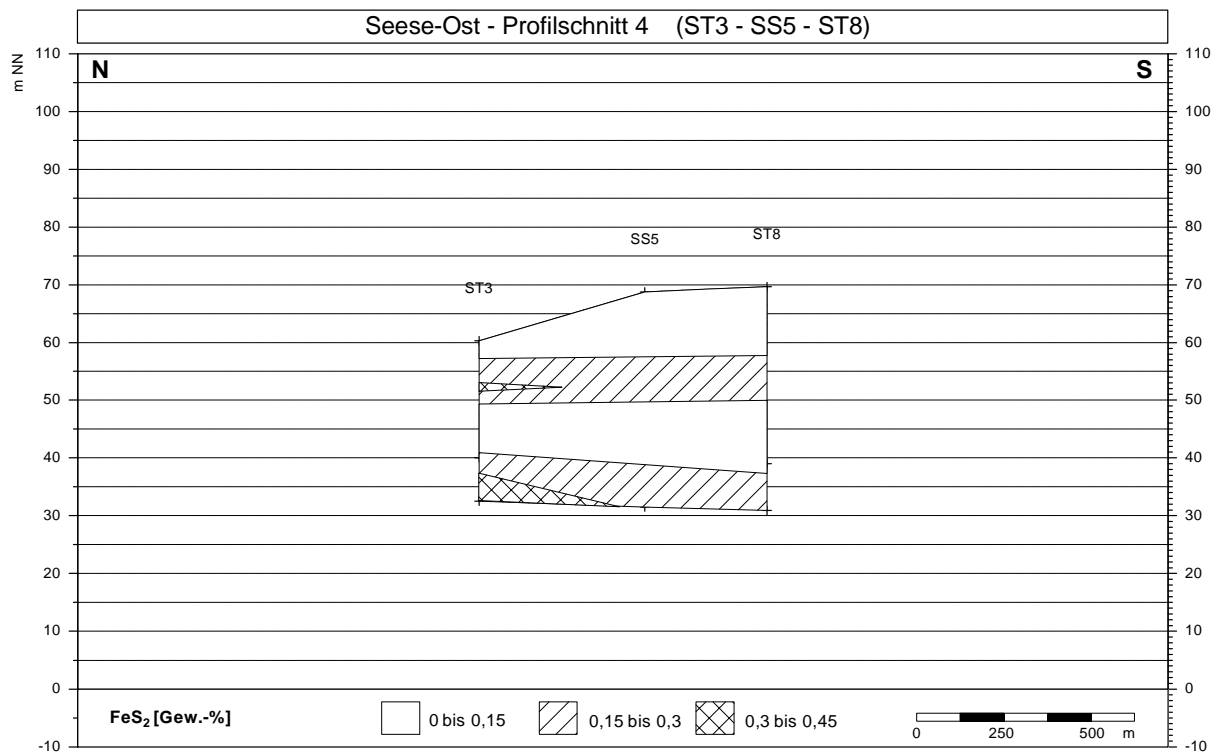
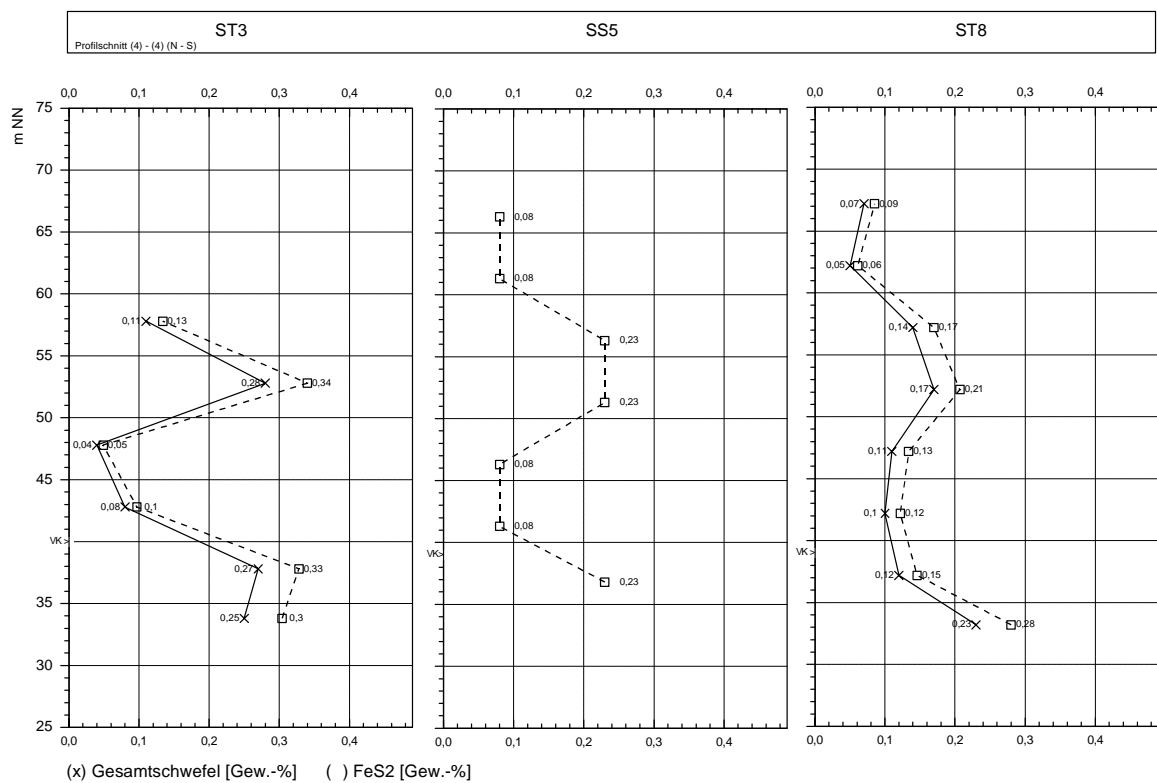
Profilschnitt (4) - (4) (N - S)

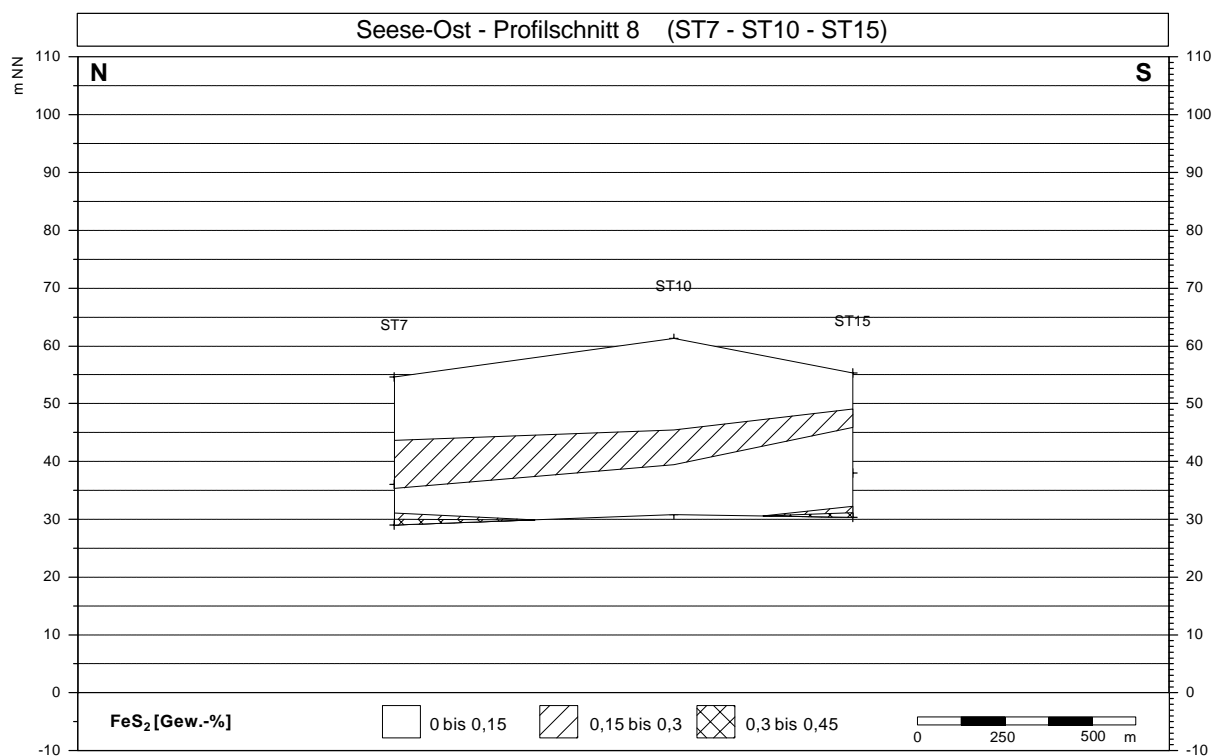
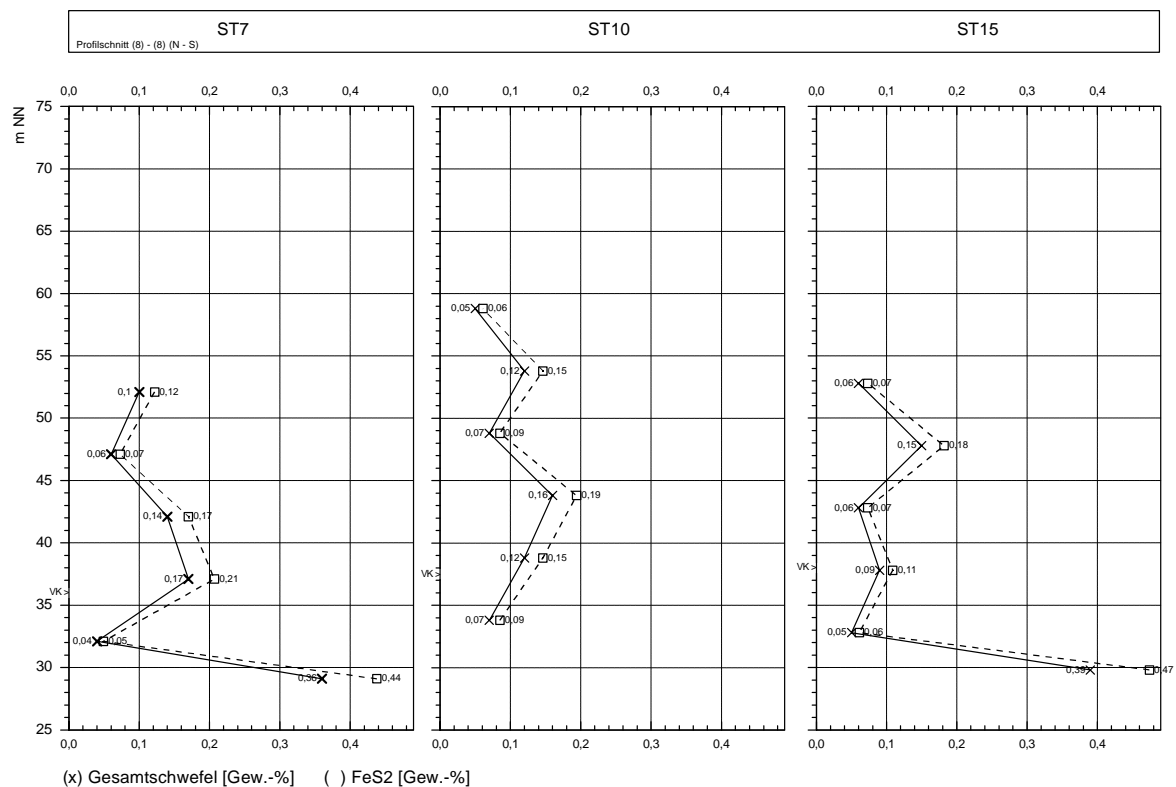


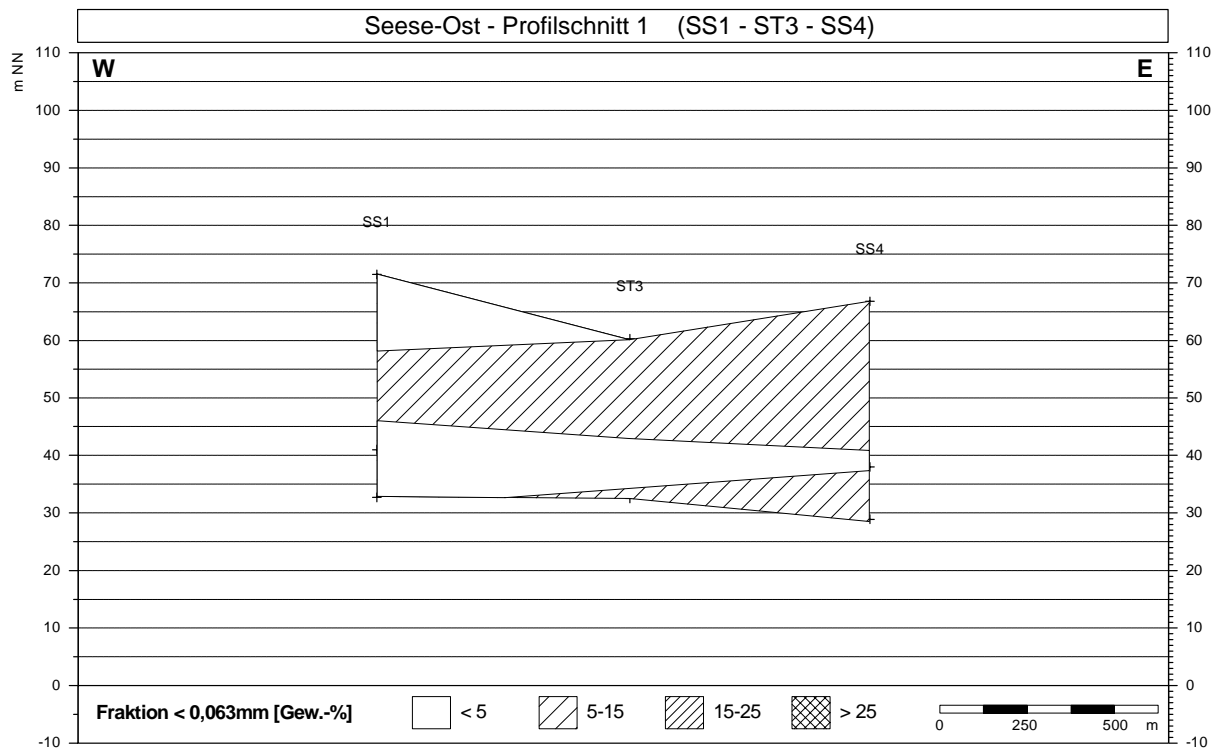
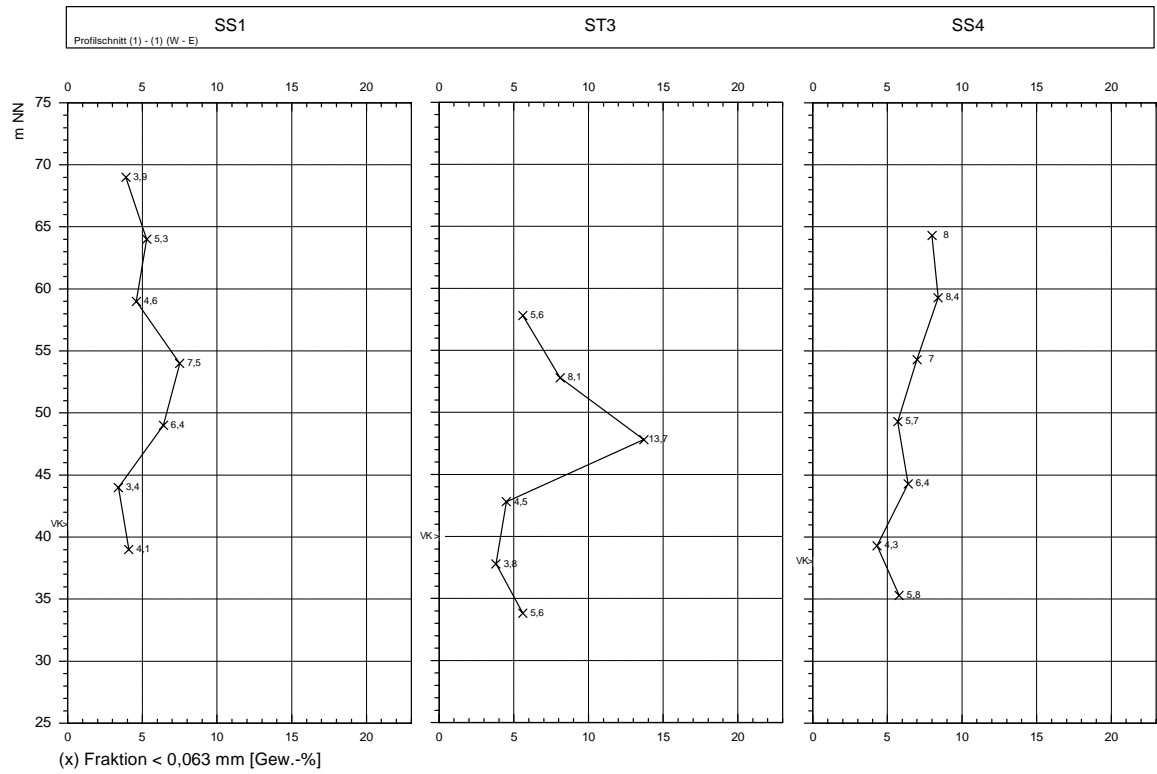
(x) Calcium [Gew.-%] (o) CaCO3 [Gew.-%]

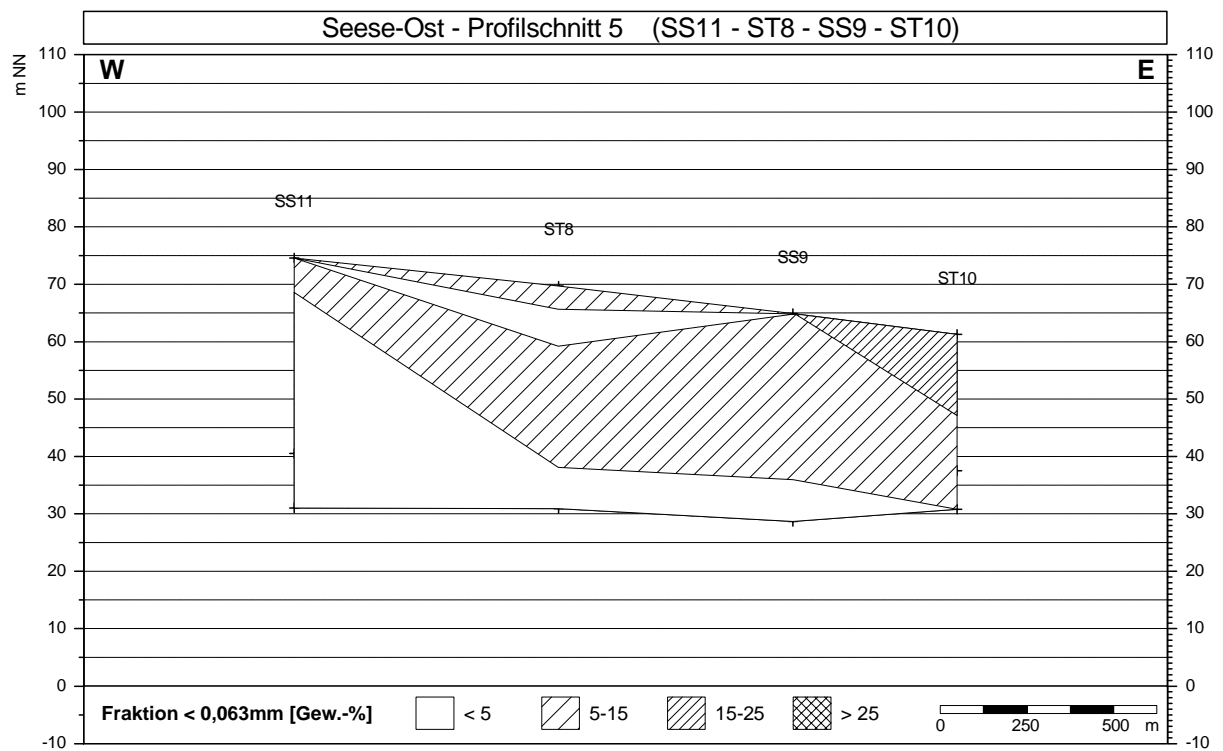
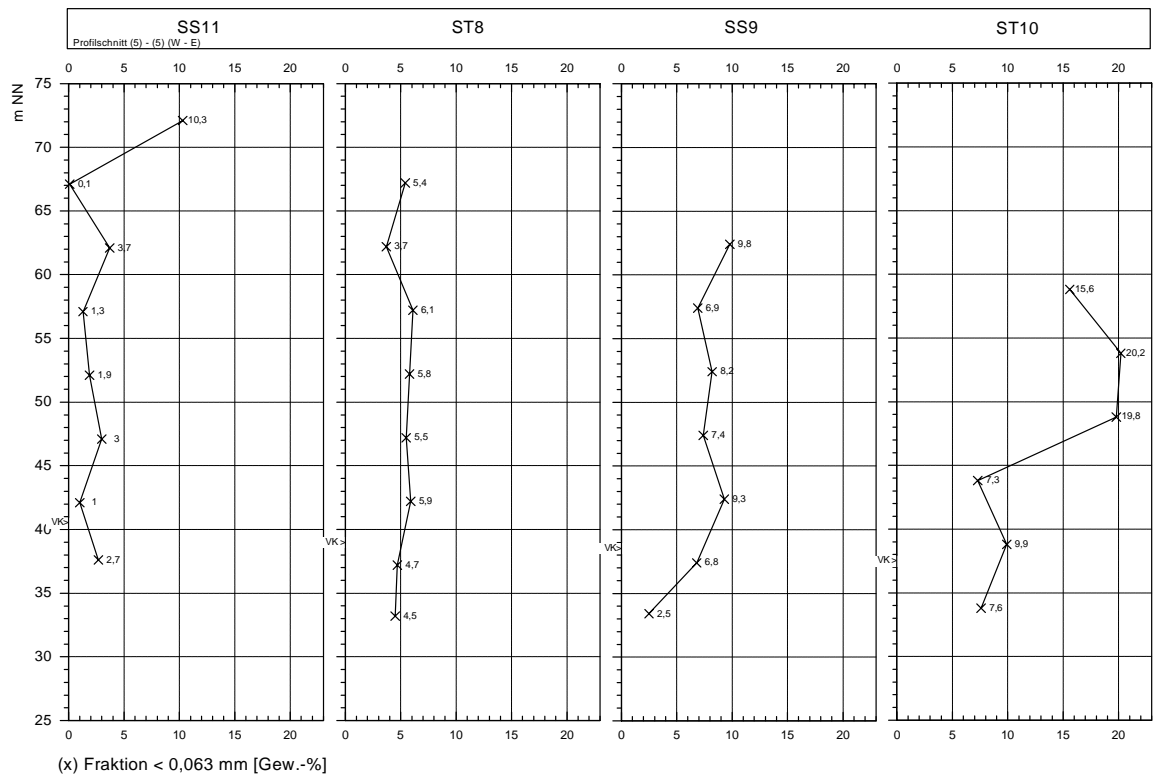


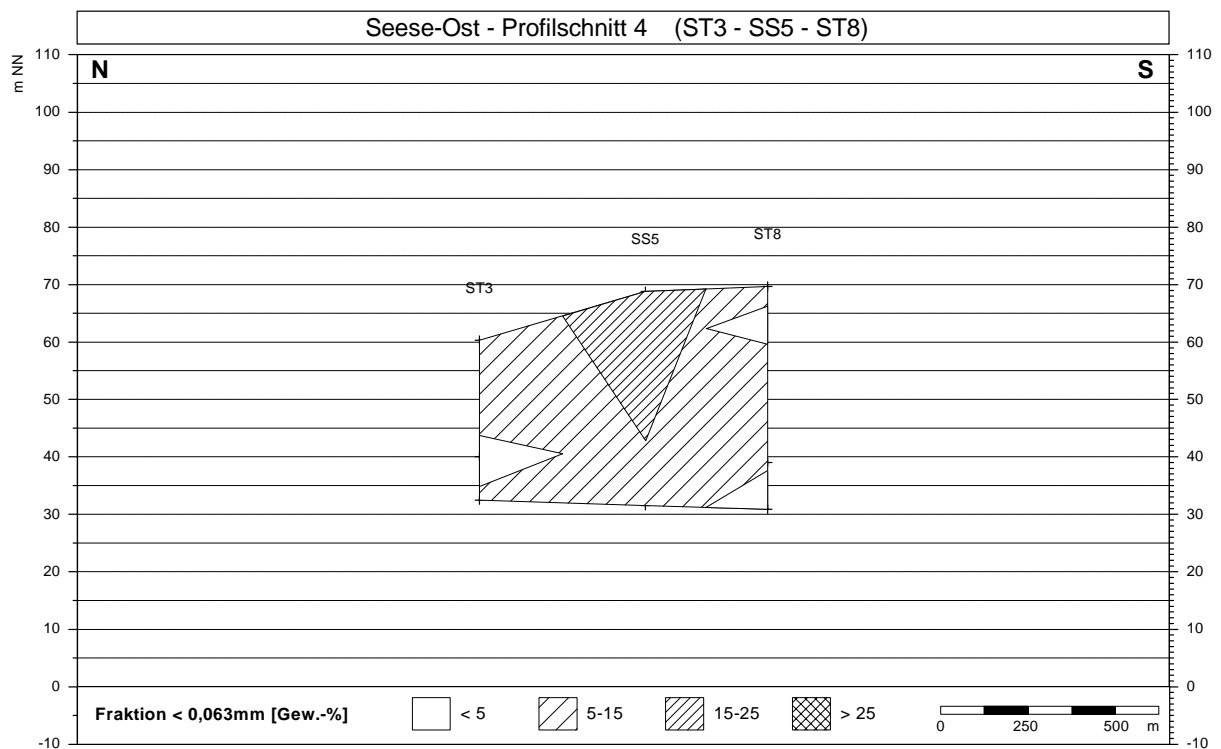
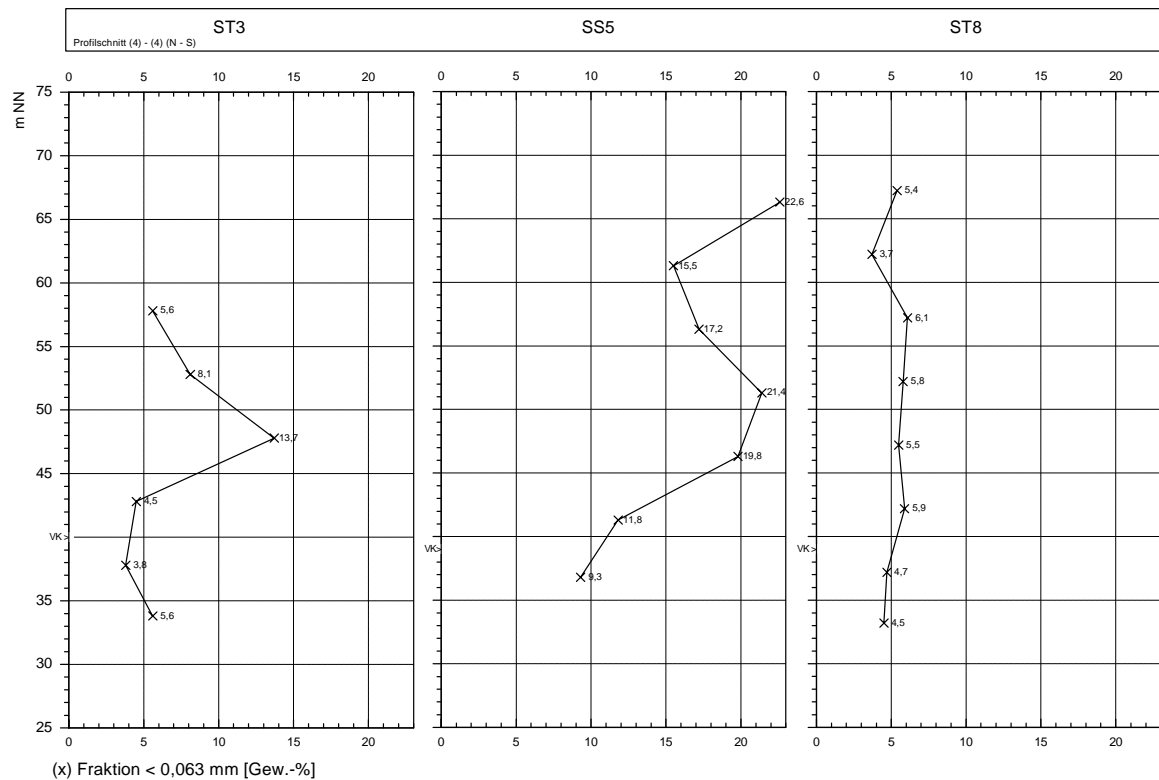


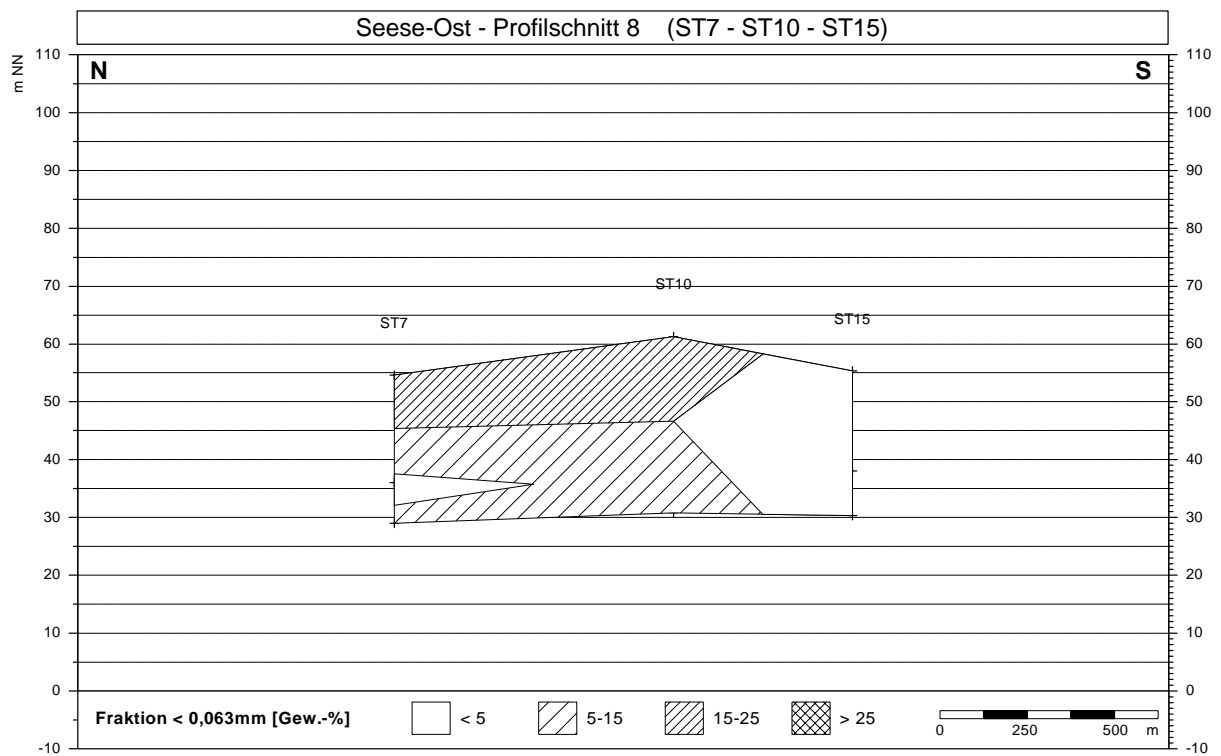
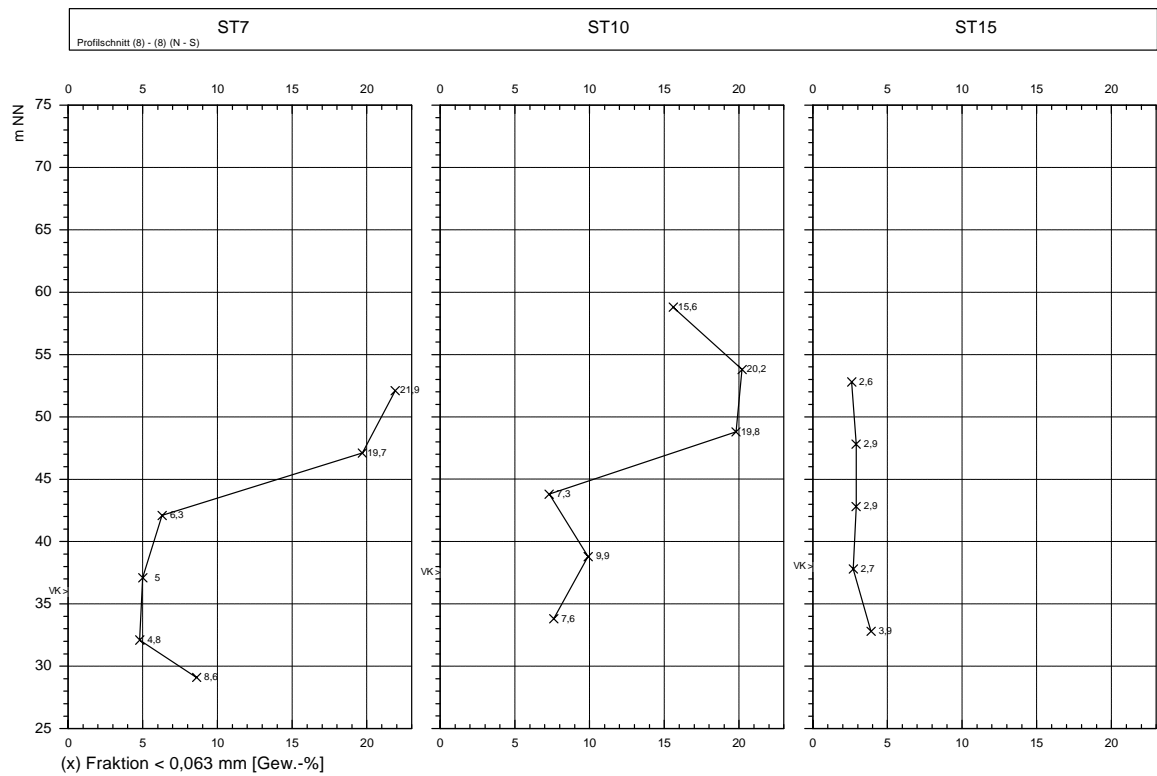




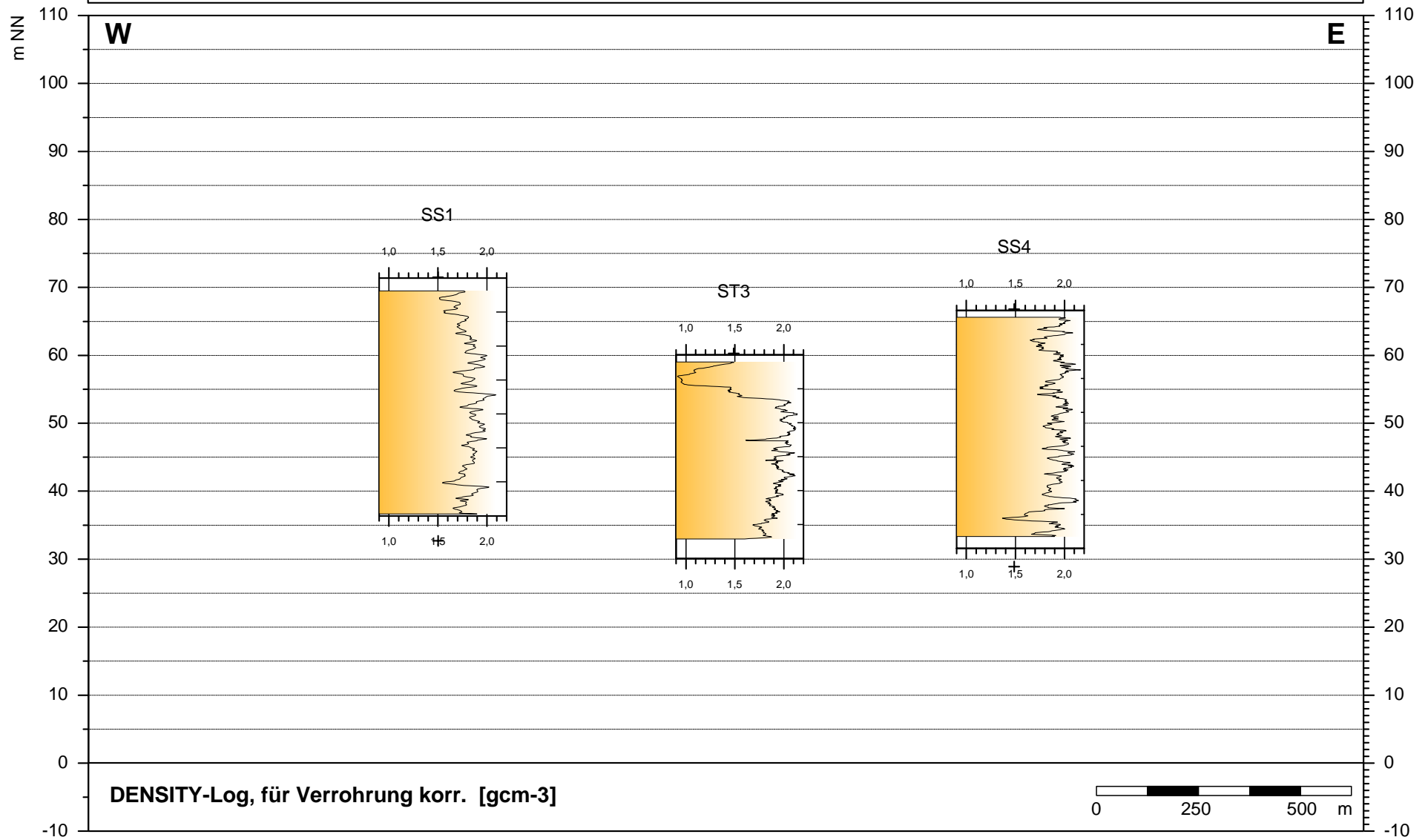




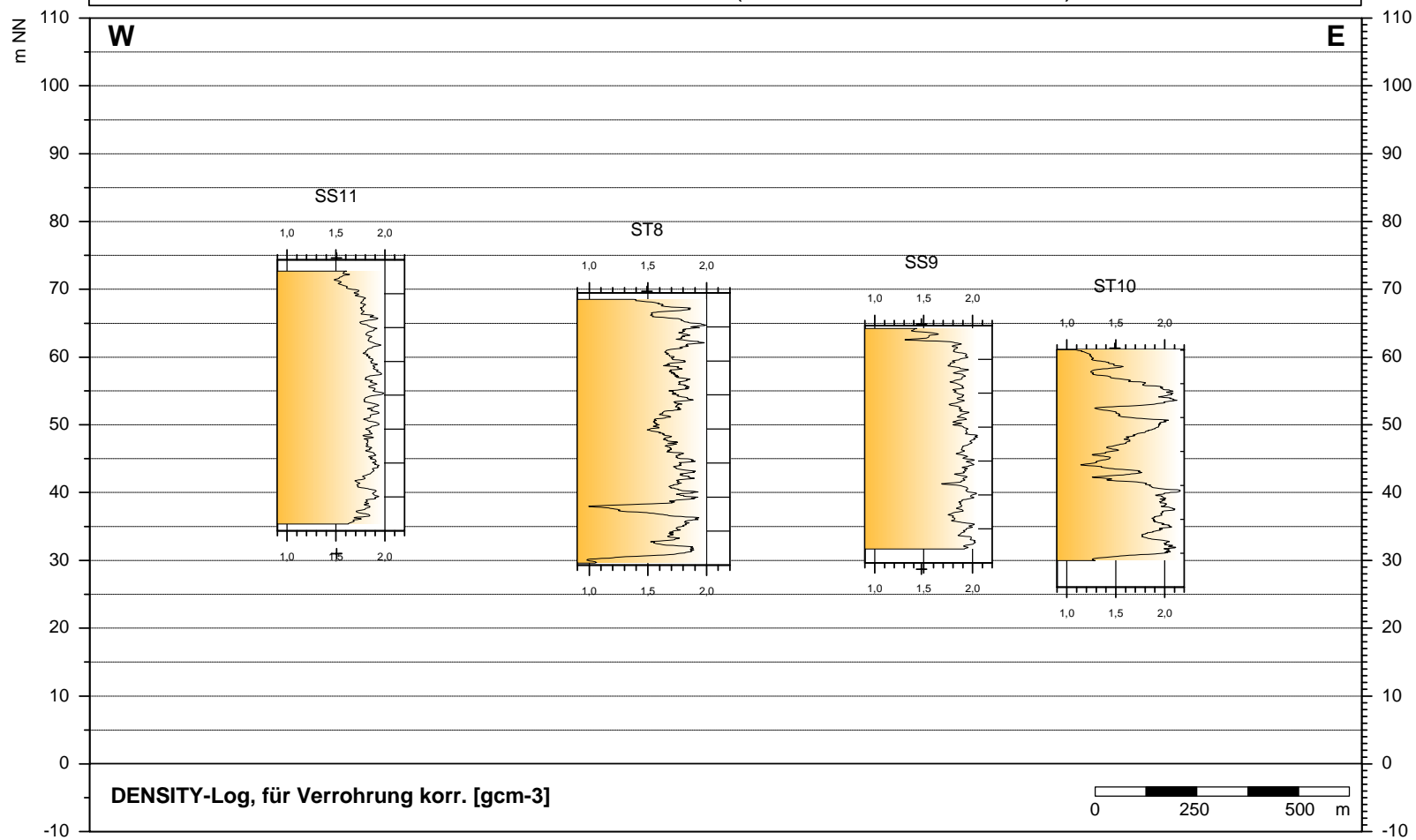




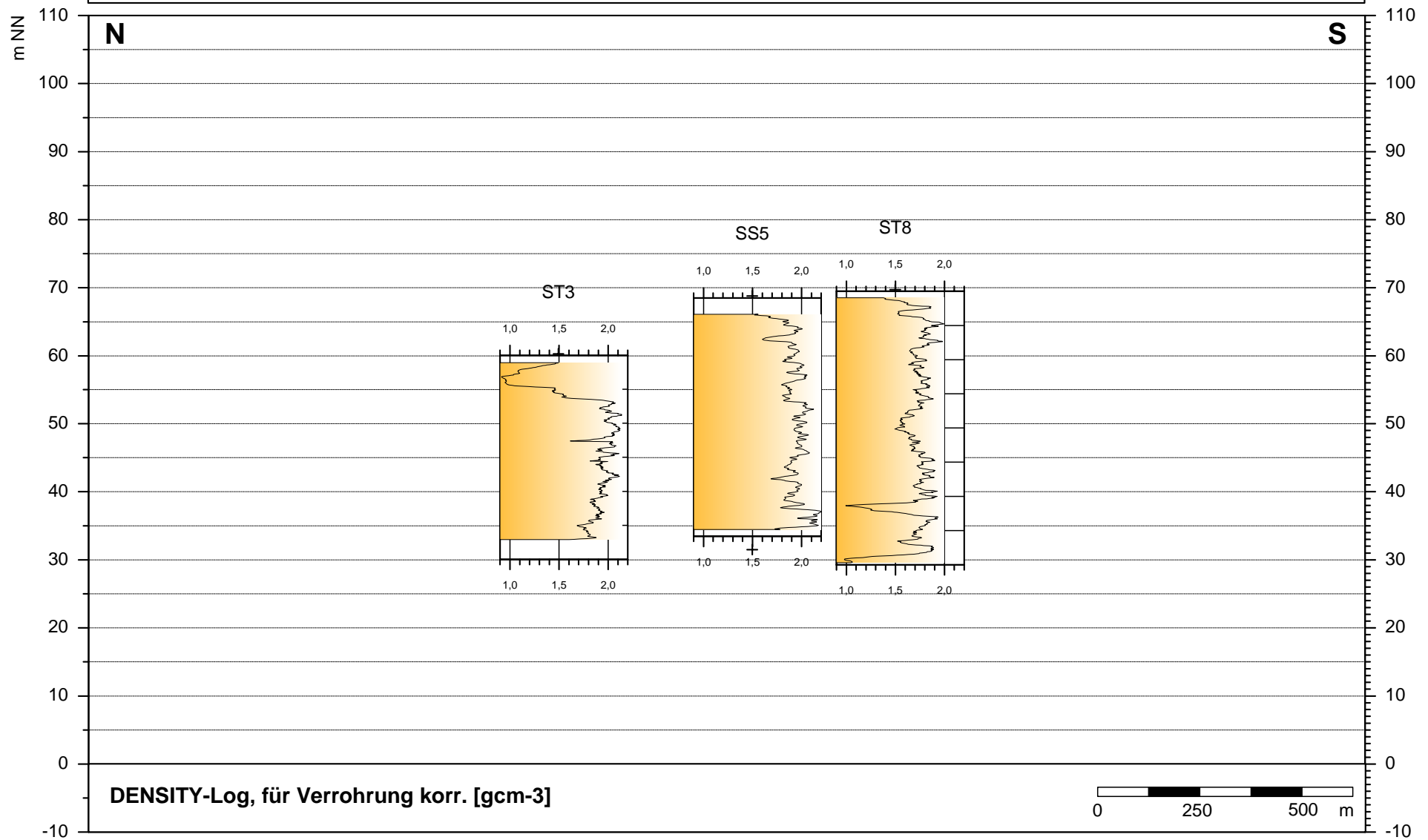
Seese-Ost - Profilschnitt 1 (SS1 - ST3 - SS4)



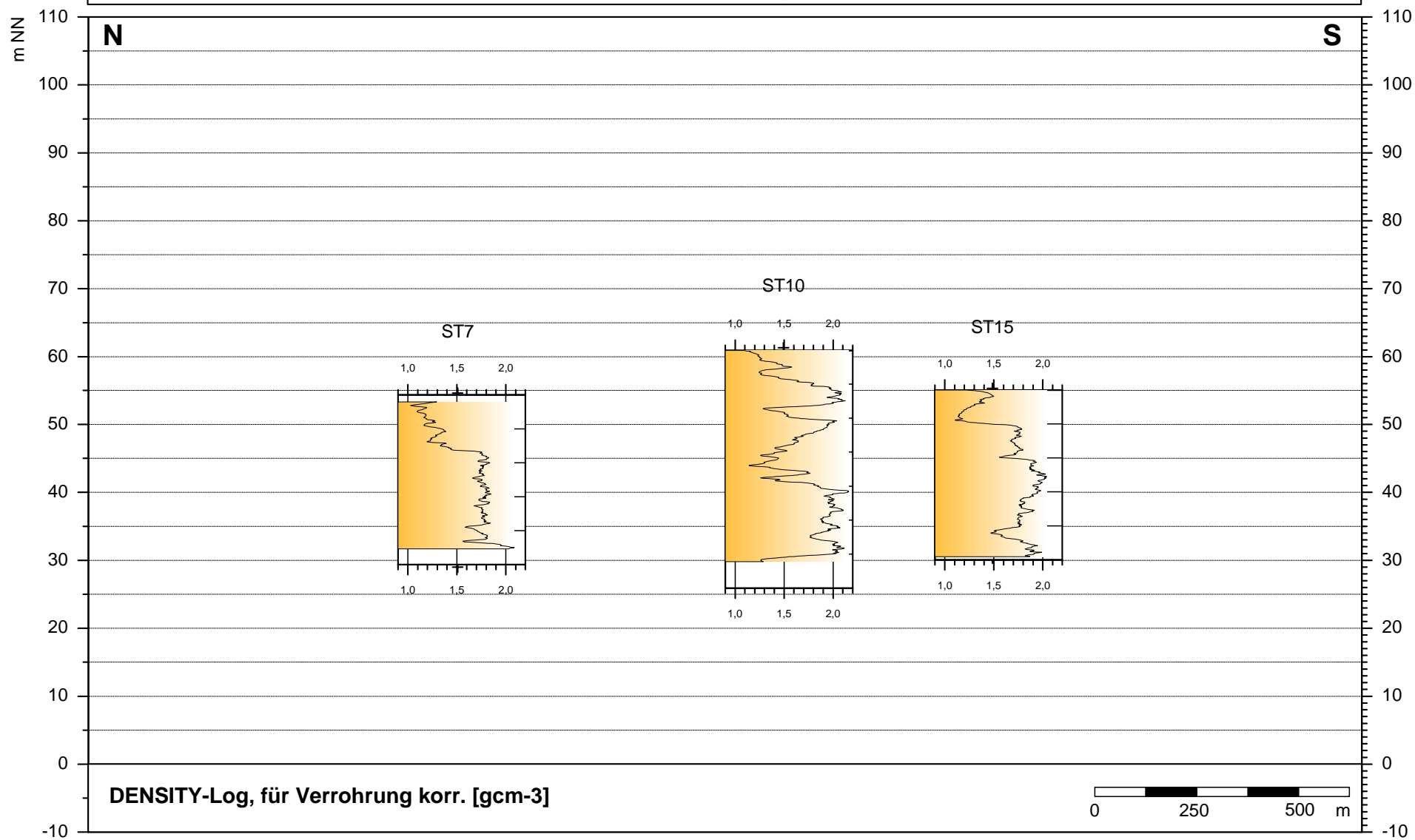
Seese-Ost - Profilschnitt 5 (SS11 - ST8 - SS9 - ST10)



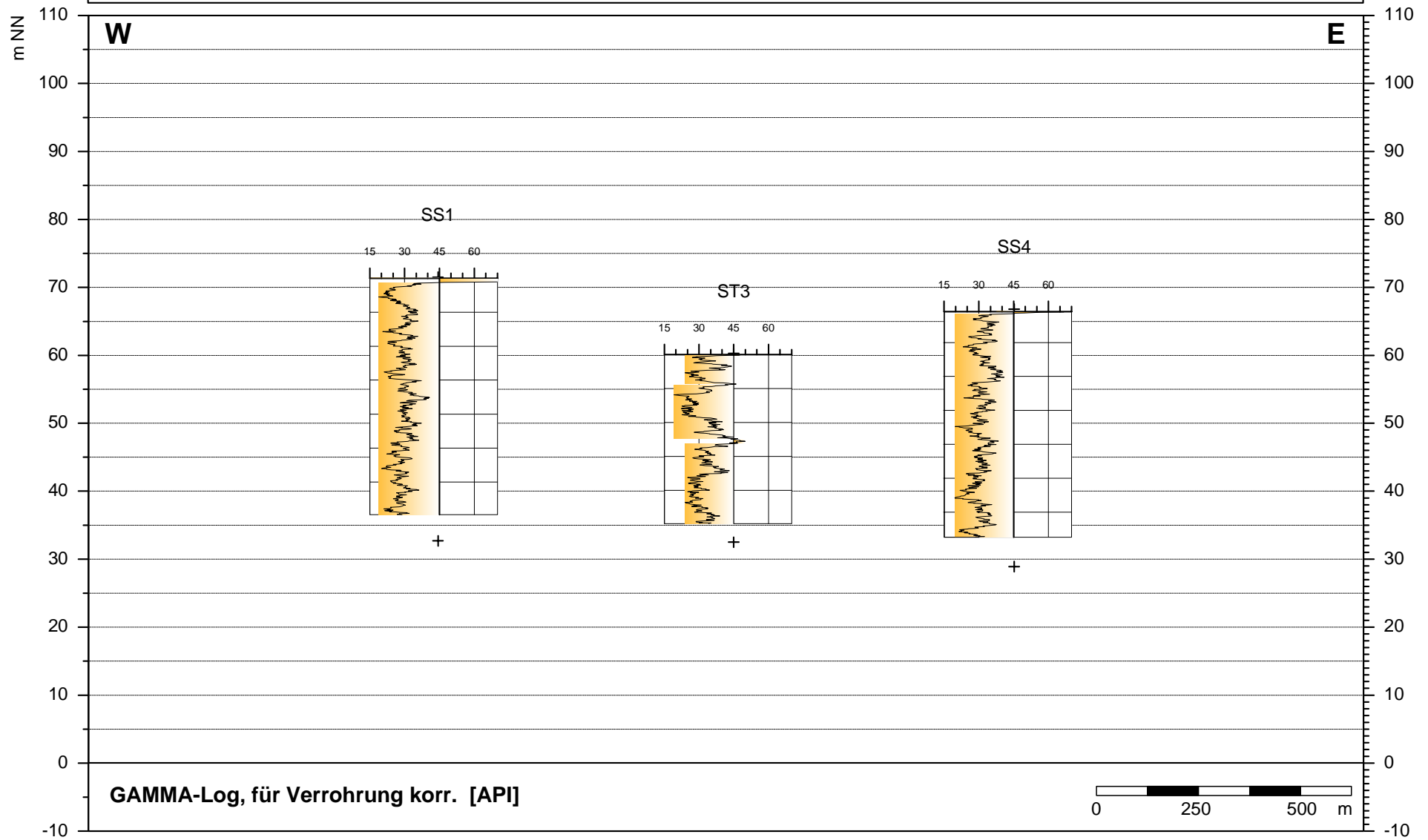
Seese-Ost - Profilschnitt 4 (ST3 - SS5 - ST8)



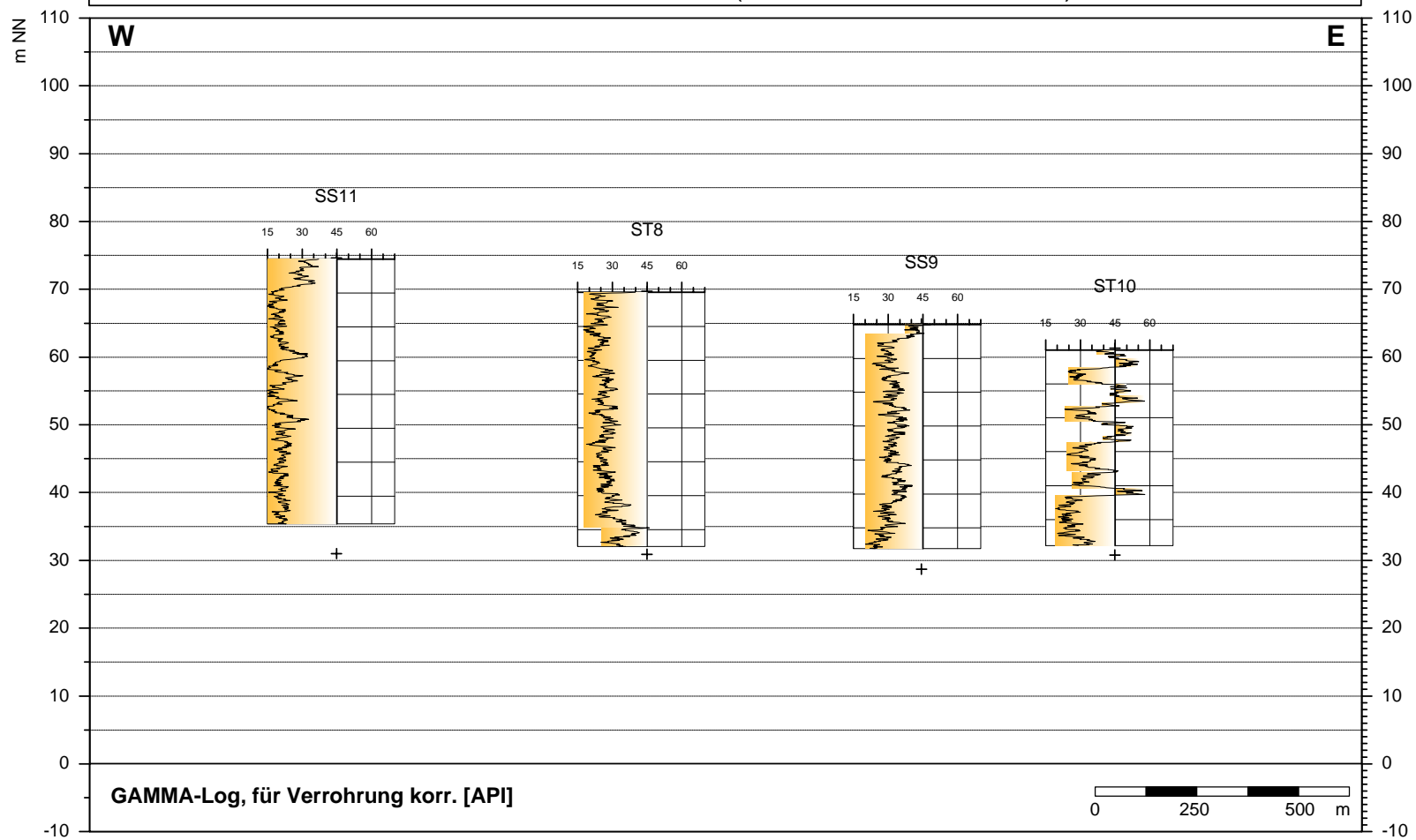
Seese-Ost - Profilschnitt 8 (ST7 - ST10 - ST15)



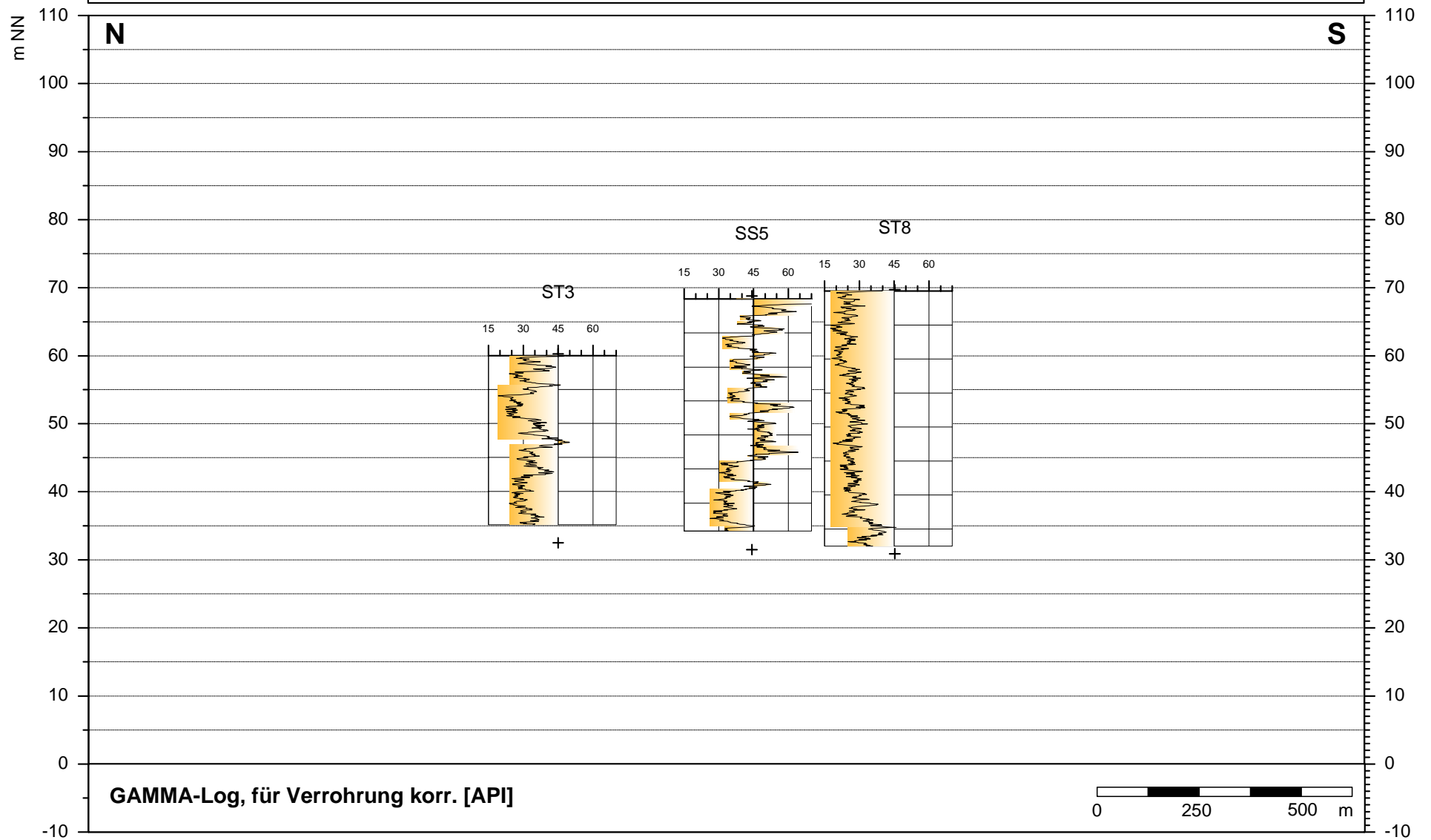
Seese-Ost - Profilschnitt 1 (SS1 - ST3 - SS4)



Seese-Ost - Profilschnitt 5 (SS11 - ST8 - SS9 - ST10)



Seese-Ost - Profilschnitt 4 (ST3 - SS5 - ST8)



Seese-Ost - Profilschnitt 8 (ST7 - ST10 - ST15)

